

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Westdeutsche Kieferklinik
Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
(Direktor: Univ.-Professor Dr. U. Stüttgen)

**Vergleich von Führungswinkeln rein zahngeführter Grenzbewegungen mit
Führungswinkeln des freien Kauens mit Hilfe des JMA-Systems**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf

vorgelegt von

Hartwig Ellerbrock

2009

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der

Medizinischen Fakultät der

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.: Univ.-Professor Dr. med. Joachim Windolf

Dekan

Referent: Professor Dr. A. Hugger

Korreferent: Univ.-Professor Dr. J. Becker

Meiner Frau und meinen Eltern in Dankbarkeit gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Was bedeutet Kauen?	7
1.2	Der Kauzyklus	9
1.3	Der Kauapparat	11
1.4	Okklusion und neuromuskuläre Adaption	13
1.5	Aufzeichnung von Kau- und Grenzbewegungen	15
2	Problemstellung	19
3	Material und Methoden	20
3.1	Untersuchungsaufbau	20
3.1.1	Probanden	20
3.1.2	Geräte und Software	20
3.2	Methoden	22
3.3	Statistische Auswertung	24
3.3.1	Der Boxplot	25
3.3.2	Statistische Signifikanz	26
4	Ergebnisse	27
4.1	Überprüfung der Messreihen	27
4.2	Auswertung der Messreihen in der Sagittalebene	29
4.3	Auswertung der Messreihen in der Frontalebene	32
4.4	Auswertung der Messreihen in der Horizontalebene	37

4.5	Zusammenfassung der Messergebnisse	41
5	Diskussion	42
5.1	Studien über die Bedeutung der Okklusionsebenenneigung und die okklusale Führung bei Kaubewegungsabläufen und Vergleich mit der vorliegenden Arbeit	43
5.2	Studien zum Okklusionsphasenbereich, der Zusammenhang zur Kauseitenpräferenz und Vergleich mit der vorliegenden Arbeit	46
5.3	Studien von Mizuno über den Zusammenhang zwischen Kauen und zahngeführter Lateralbewegung und Vergleich mit der vorliegenden Arbeit	48
5.4	Geschlechtsunterschiede in der Kauzyklus-Kinematik und deren Bedeutung für die Messungen der vorliegenden Arbeit	50
5.5	Studien über den Einfluss des Nahrungsbolus auf den Kaubewegungsverlauf und deren Bedeutung für die Messungen der vorliegenden Arbeit	51
5.6	Studien über intraorale Fremdkörperreize und Vergleich mit deren Relevanz in der vorliegenden Arbeit	52
5.7	Untersuchungen über Haut-Marker für die optoelektronische Bewegungsaufzeichnung und Vergleich mit dem Mess-Ziel der vorliegenden Arbeit...	53
5.8	Untersuchungen von Pröschel zur individuellen Registrierung von Unterkiefer-Bewegungen und Vergleich mit dem Messsystem der vorliegenden Arbeit	55
5.9	Untersuchungen zum Zusammenhang der Zahnführung mit der Kaubewegung über die Zahnführungsrate und Vergleich mit der Vorgehensweise in der vorliegenden Arbeit	56
5.10	Studien zur Kaufrequenz und deren Gewichtung in der vorliegenden Arbeit...	

6	Zusammenfassung	62
7	Literaturverzeichnis	63
8	Lebenslauf	69
9	Abstract	71

1 Einleitung

1.1 Was bedeutet Kauen?

Das Kauen ist neben dem Atmen, Schlucken und Sprechen eine der wesentlichen Funktionen des Kauorgans bzw. –systems und dient primär der Nahrungszerkleinerung. Kaubewegungen sind rhythmische „Auf-Ab-Bewegungen“ in Kombination mit Seitwärtsbewegungen des Unterkiefers, die vom Abbeißen oder Einbringen der Nahrung in die Mundhöhle eingeleitet werden. Beim Kieferschluss können enorme Muskelkräfte entwickelt werden (Reitemeier et al. 2006). Bei manchen Menschen entsprechen sie der Kraft, die erforderlich wäre, um das eigene Körpergewicht zu stemmen. Für die Eindämmung des großen autodestruktiven Potenzials dieser Kaukräfte sind die Steuer- und Kontrollmechanismen des Kauens von entscheidender Bedeutung.

Der willkürlichen Aktion des Abbeißens folgt die Automatik des Kauens, eine Art unbewusster Programmablauf. Es wird ein „Kaumustergenerator“ postuliert, der in komplexer Vernetzung im und mit dem Zentralen Nervensystem zyklisch-rhythmische Öffnungs- und Schließbewegungen erzeugt. So wird durch eine Feedback- eine Feedforward-Situation geschaffen, die das automatische Programm ablaufen lässt, bis z.B. auf einen Kirsch Kern gebissen wird. Ein solches unerwartetes Hindernis löst einen Reflex aus, der schlagartig Ober- und Unterkiefer auseinanderbringt und die anfängliche Feedback-Situation herstellt. Ein solcher Reflex verhindert auch, dass die Zahnreihen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander schlagen, wenn hartes Kaugut, wie Nüsse, nach großer Krafteinleitung plötzlich nachgibt. Wie „Sicherheitsgurte“ funktionieren die Öffnungsmuskeln. Diese werden bei stärkerer isometrischer Kontraktion der Schließmuskeln zur Positionierung des Kiefers aktiviert und wirken einer plötzlichen Annäherung der Kiefer entgegen (Reitemeier et al. 2006).

Die Ergebnisse einer Studie von Schindler und Mitarbeitern belegen ein positives Feedback der Parodontalrezeptoren auf die Kaukraftsteuerung (Schindler et al. 1997). Den Gelenkrezeptoren komme hingegen weniger Bedeutung für die Bewegungssteuerung zu. Der Ausfall von Parodontal- und Gelenkrezeptoren wird offensichtlich durch die Muskelspindeln weitgehend kompensiert. Dies bestätigt die Bedeutung der Muskelspindeln für die neuromuskuläre Steuerung des menschlichen Kausystems.

Beim Kauen kommt die Nahrung mit dem Speichel in Kontakt. So stellt der fertiggekaute, eingespeichelte und zum Schlucken bereite Nahrungsbolus eine weitere Unterbrechung des Kautvorganges dar. Durch die richtige Konsistenz wird über Rezeptoren das Signal an das Zentrale Nervensystem weitergeleitet, dass nun das Kauprogramm wiederum unterbrochen werden kann, und der Schluckvorgang wird eingeleitet. Dabei wird der Nahrungsbrei durch die Speiseröhre in den Verdauungstrakt befördert.

Bei den Kaubewegungen gibt es eine große intra- und interindividuelle Variationsbreite. Jedoch existiert beim Zubeißen bzw. beim „Schlussbiss“ eine einzige sogenannte „Zentrik“, welche immer wieder eingenommen werden kann. Wenn diese eine Position trotz zusammenpassender Zahnreihen vom Individuum nicht oder nicht einfach wiedergefunden wird, spricht man bereits von einer Fehlfunktion des Kausystems.

Die bereits erwähnte starke Individualität des Kauens wird durch mehrere Parameter gekennzeichnet: den Bewegungsablauf, die Dauer eines Kautvorganges bis zum Hinunterschlucken der Nahrung, die Kaufrequenz und auch den Muskeleinsatz. Diese Attribute werden wiederum ihrerseits durch viele Faktoren beeinflusst.

Einen wichtigen Umstand bildet die Beschaffenheit des Zahnstatus. Woda führte zu diesem Thema Untersuchungen an Nahrungsboli durch (Woda et al. 2006b). Er

stellte zunächst fest, dass die o.g. Kauparameter charakteristisch für jedes Individuum waren, und dass eine Veränderung dieser Merkmale auf eine Adaption des Kausystems an die Größe, die Härte oder die viskoelastischen Eigenschaften der jeweiligen Nahrung schließen ließ. Trotzdem zeigten die schluckbereiten Nahrungsboli aller gesunden Probanden eine ähnliche Konsistenz und Partikelgrößenverteilung. Ferner beobachtete Woda, dass mit fortschreitendem Alter der Probanden offenbar eine Adaption der Kaufunktion an einen sich individuell ändernden Zahnstatus stattfindet und die Schluckfunktion nicht beeinträchtigt wird. Außerdem zeigte ein Anstieg der elektromyografischen Aktivität, dass Totalprothesenträger mehr Energie für das Kauen aufwenden müssen. Trotz dieser angestiegenen Muskelaktivität behindert offenbar der Verlust der Zähne – wenn auch durch eine Prothese ersetzt – die Formation eines normalen Nahrungsbolus. In der Studie von Woda enthielten somit die Boli von Totalprothesenträgern viele große, unfertig zerkaute Partikel. Diese Beeinträchtigung des Kauvorganges bei Totalprothesenträgern ähnelt den mastikatorischen Behinderungen, die man bei Personen mit neuromotorischen Fehlfunktionen beobachtete.

Es ist also nicht verwunderlich, dass Träger von Vollprothesen bewusst oder unbewusst ihre Ernährung auf ihr vermindertes Kauvermögen einstellen und weichere Nahrung oder kleiner zubereitete Nahrungsstücke zu sich nehmen. Damit ist die erste Stufe der Verdauung verändert, und als Folge des Meidens z.B. von frischem Obst und Gemüse können Vitamin- und Ballaststoffmangelerscheinungen resultieren.

1.2 Der Kauzyklus

Beim Abbeißen der Nahrung und dem Platzieren des Fragmentes zwischen den Molaren und Prämolaren der Arbeitsseite wird die Bewegung des Unterkiefers eingeleitet. Als Arbeitsseite wird die Seite des Unterkiefers verstanden, die sich bei

einer Lateralbewegung von der Medianebene wegbewegt. Demgegenüber befindet sich in dem Moment auf der anderen Seite die Balanceseite.

Der Abschnitt von der Nahrungsaufnahme bis zum finalen Schluckakt wird Kausequenz genannt. Diese wird durch drei aufeinander folgende Perioden gekennzeichnet: eine kurze Transportperiode, während der die Nahrung zwischen die Molaren und Prämolaren bewegt wird, eine Zerkleinerungsperiode, deren Dauer von der Beschaffenheit der Nahrung abhängt, und eine von irregulären Kieferbewegungen gekennzeichnete Periode, die der Reinigung der Mundhöhle und der Bolusformation vor dem finalen Schluckakt dient.

Die Kausequenz setzt sich aus einer mehr oder weniger großen Zahl von einzelnen Kauschlägen oder auch „Kauzyklen“ zusammen. Der Kauzyklus kann beim Menschen grundsätzlich in drei Hauptphasen unterteilt werden: die Öffnungsphase, die „schnelle Schließphase“ und die Phase des sog. „power strokes“ bzw. die „langsame Schließphase“. Letztere mündet in eine kurze okklusale Haltephase von einer Dauer von ca. 190 ms, bevor das nächste Öffnen stattfindet und der nächste Kauzyklus beginnt.

Im Einzelnen beschreibt der Kauzyklus das Intervall zwischen zwei Wendepunkten von der Schließ- in die Öffnungsbewegung. Zu Beginn führt die Mandibula eine Öffnungsbewegung durch, wobei gleichzeitig eine mehr oder weniger ausgeprägte laterale Ausholbewegung stattfindet, die meist der Kauseite des jeweiligen Kauschlages entgegengerichtet ist. In der frühen Schließphase wandert der Inzisalpunkt nach lateral und der Kondylus der Arbeitsseite ca. 0,3 mm nach hinten oben in der Fossa mandibularis, während dabei der Gelenkkopf der Balanceseite nach vorne unten und innen läuft. Durch diesen geführt, wird bei dessen Zurückgleiten im Verlauf der weiteren Schließbewegung der Inzisalpunkt auf einer inkursiven Bahnkurve in den Bereich der habituellen Interkuspitation zurückbewegt. Währenddessen wandert der Kondylus der Arbeitsseite ebenfalls durch eine

geringfügige Bewegung nach vorne unten in seine ursprüngliche Startposition zurück.

Ein einzelner Kauzyklus dauert im Mittel etwa 0,5 bis 0,7 Sekunden, abhängig von der Textur des Nahrungsmittels. Ebenso abhängig von der Textur sowie von der anfänglichen Größe des Speisebolus ist die vertikale Amplitude des Kauzyklus und die Anzahl der Kauzyklen bis zur Schluckfähigkeit.

Bis der Speisebolus seine Schluckfähigkeit erreicht hat, erfolgt eine rhythmische Wiederholung dieser Kauzyklen mit wechselnder Kauseite. Während der frühen Entwicklung des Kausystems wird wahrscheinlich eine bevorzugte Kauseite geprägt, die bei den meisten Menschen zu erkennen ist (siehe auch Kapitel 5 (Varela et al. 2003)).

Neben dem finalen Schluckakt gibt es intermediäre Schluckakte, welche in 80% aller Kausequenzen die Zerkleinerungsperiode unterbrechen (Hugger et al. 2006). Die Härte der Nahrung bestimmt deren zeitliches Auftreten. Je härter die Nahrung, desto höher die Anzahl der Kauzyklen vor einem intermediären Schluckakt. Die Dauer einer Kausequenz bzw. die Anzahl der Kauzyklen, die individuell für die Aufbereitung der gleichen Nahrungstextur bis zum Schluckakt benötigt wird, variiert sehr stark. Sie wird nicht nur von der Textur selbst sondern auch vom Kauvermögen der einzelnen Person bestimmt.

Damit gelangt man zu den Begriffen der „Kauleistung“ und „Kau-effektivität“, welche die Kaufunktion bewerten. Dazu wurden Testmethoden eingesetzt, die die Partikelzahl, die maximale Partikelgröße und die Partikelgrößenverteilung des Nahrungsmittels ermitteln und somit dessen Zerfallseigenschaften beim Kauen beschreiben können. Die Kauleistung wird durch die Partikelgrößenverteilung nach einer vorgegebenen Anzahl von Kauzyklen definiert, die Kau-effektivität durch die Anzahl der Kauzyklen, die notwendig ist, um die Nahrung bis zu einer bestimmten maximalen Partikelgröße zu reduzieren. Im physikalischen Sinne erlauben jedoch

beide Kenngrößen keine Aussage über die tatsächlich vom Kausystem geleistete Arbeit.

1.3 Der Kauapparat

Welche anatomischen Strukturen sind nun am Kauakt beteiligt? Zunächst wirken die Zähne und das Parodontium mit. Die 32 Zähne des voll ausgebildeten Gebisses eines Menschen, deren äußere Schicht, der Schmelz, im Wesentlichen aus knochenähnlichem Hydroxylapatit besteht, gliedern sich in 8 Schneidezähne, 4 Eckzähne, 8 Prämolaren und 12 Molaren. Die Funktion eines jeden Zahnes prägt seine bestimmte Form und Größe. Die Kronen der Schneidezähne sind mit Scherblättern vergleichbar, welche die Nahrung in Bisse zerschneiden, indem ihre scharfen Kanten aneinander vorbeigleiten. Die Seitenzähne besitzen ein kompliziertes Höckerrelief, das sich durch Kanten und Facetten auszeichnet. Das Höckerrelief der Kauflächen kann auch als Ausdruck „evolutiv optimierter Konstruktion zur Bewältigung der artspezifischen Kaumechanik“ gesehen werden (Hugger et al. 2006). Beim Kauakt werden Kräfte frei, welche über die Zahnwurzeln in die Kiefer weitergeleitet werden. Dabei ist die verbindende Struktur von Zahn und Kieferknochen das Parodontium. Es besteht im Wesentlichen aus vielen weitgehend horizontal ausgerichteten Kollagenfasern, in die Blutgefäße und Nervenendigungen eingebettet sind (Desmodont). Dieses „visko-elastische“ System gewährleistet eine großflächige Weiterleitung der an der Zahnkrone auftretenden Kräfte über die Wurzeln in den Kieferknochen. Darüber hinaus besitzt das Desmodont eine Vielzahl von Rezeptoren und kann so als Sinnesorgan fungieren, indem es dem Zentralnervensystem Informationen über Größe, Richtung und Impuls der einwirkenden Kräfte liefert.

Die Muskulatur ist ein weiterer wichtiger Teil des Kausystems. Es gibt sieben Kaumuskelpaare, die am Unterkiefer als dem einzigen beweglichen Knochen des

Schädels ansetzen. Der M. temporalis, der M. masseter und der M. pterygoideus medialis sind die mächtigsten hinsichtlich Größe und Kraftentwicklung. Ihre Hauptaufgabe ist die Hebung des Unterkiefers, die zum Kieferschluss führt. Die wichtigsten funktionellen Antagonisten dieser Muskeln sind der untere Kopf des M. pterygoideus lateralis sowie der vordere Bauch des M. digastricus. Diese relativ einfach strukturierten Muskeln bewirken zusammen mit dem M. mylohyoideus und dem M. geniohyoideus eine Senkung des Unterkiefers und damit eine Kieferöffnung. Verantwortlich für den Vor- und Seitschub des Unterkiefers sind bei beidseitiger bzw. einseitiger Kontraktion überwiegend der untere Kopf des M. pterygoideus lateralis (Murray et al. 2007), für den Rückschub hauptsächlich die hinteren Anteile des M. temporalis. Demgegenüber wird dem oberen Kopf des M. pterygoideus lateralis eine stabilisierende Funktion beim Schließen des Kiefers zugesprochen. Die beiden Köpfe des M. pterygoideus lateralis wurden als funktionelle Antagonisten angesehen, bis Murray und Mitarbeiter durch Studien zeigten, dass eine scharfe Abgrenzung der Funktionen nicht mehr vorgenommen werden kann (Murray et al. 2007). Vielmehr wird der Muskel durch die biomechanischen Anforderungen bestimmend beeinflusst. So erfüllt die Funktion des M. pterygoideus lateralis nicht nur eine einzige Aufgabe, sondern kann sich der jeweilig zu leistenden Arbeit im Rahmen der physiologischen Möglichkeiten anpassen. Bereits 1998 bestätigten die Ergebnisse einer Studie von Schindler et al. die heterogene Aktivierbarkeit eines einzelnen Kaumuskels im Sinne einer funktionellen Kompartimentierung (Schindler et al. 1998).

Außer der Muskulatur spielt beim mastikatorischen Prozess auch die Zunge eine wichtige Schlüsselrolle. Bei der Nahrungsaufnahme jedoch kann beim Menschen nur noch rudimentär ein primärer Transportprozess beobachtet werden, welcher den initialen Transport der Nahrung vom Frontbereich nach seitlich hinten zwischen die Seitenzähne bewirkt. Die Zungenbewegung kann als eine zyklische anterior-posteriore Bewegung beschrieben werden, die mit einer Vertikalbewegung des Unterkiefers einhergeht. Sind die Zahnreihen voneinander getrennt, ist die

Zunge meist zurückgezogen. Bei Kieferannäherung und Kieferschluss nimmt sie eine protrudierte Position ein.

In diesem Zusammenspiel verschiedener Organe spielen die Lippen ebenfalls eine wichtige Rolle. Zum einen verschließen sie den Mundraum beim Kauakt und verhindern dadurch das Austreten von Speise. Zum anderen unterstützen die Lippen die Nahrungsaufnahme. Zunge und Wangen sind für die korrekte Positionierung des Bolus zwischen den Zahnreihen zuständig. Die Speicheldrüsen stellen das notwendige „Schmiermittel“ bereit, damit diese Vorgänge z.B. bei der Zerkleinerung von Nahrung reibungsarm ablaufen.

1.4 Okklusion und neuromuskuläre Adaption

Abbeißen und Kauen sind die wichtigsten Aufgaben der Kauflächen der Zähne. Darüber hinaus haben sie eine wichtige Funktion bei der Stabilisierung des Unterkiefers gegen den Schädel. Beim Zubeißen sollte die Berührung zwischen den Okklusionsreliefs im Ober- und Unterkiefer überall gleichmäßig erfolgen. Unter diesen Voraussetzungen werden große Parodontalareale aktiviert. Dies führt zu einer Dämpfung der Belastungsspitzen auf Knochen und Zahnhartsubstanz. So können die beteiligten Strukturen über lange Zeit auf einer akzeptablen Funktionsstufe arbeiten.

Stimmt nun z.B. bei einem Frühkontakt die Form des unteren Okklusionsreliefs mit der Form des oberen nicht überein, oder stimmen die Positionen der Reliefs der beiden Okklusionsflächen nicht überein, wird jedes Mal, wenn vom Individuum der Schlussbiss eingenommen werden soll, ein korrigierender muskulärer Aktivierungs-Impuls vom ZNS ausgelöst. Ob dies kurz- oder langfristig zu einer pathologischen Reaktion führt, hängt sowohl von der Zeit als auch vom Grad der

Aktivitätsentfaltung ab (Koeck und Lückerrath 1995). Darüber hinaus tolerieren sogenannte „okklusionspassive“ Personen gegenüber „okklusionsaktiven“ Menschen bis zu einem höheren Grade Frühkontakte, fehlende Stützzonen oder einen übergroßen Interokklusalraum, ohne dass es zu pathologischen Folgen kommt.

Es gibt grundsätzlich zwei Arten der Okklusion: die physiologische und die therapeutische Okklusion. Die physiologische Okklusion ist von der Natur geschaffen. Sie ist nicht notwendigerweise identisch mit der in Lehrbüchern beschriebenen idealen Okklusion. Selbst bei erheblichen Abweichungen kann man akzeptable Form-Funktions-Verhältnisse im stomatognathen System besitzen. Dies führt zu einer großen Variationsbreite von akzeptablen, physiologischen Okklusionen.

Aufgrund vielfacher Wechselbeziehungen ist die Okklusion keine eigenständige Funktion und dient auch keinem definierten Einzelziel (Woda 2005). Vielmehr beschreibt der Begriff ein Verhältnis zwischen den Zahnreihen, das zusammen mit anderen Organen dafür sorgt, dass die Nahrung zerkleinert und daraus ein Bolus gebildet wird. In vielen Studien wurde also die Kauleistung anhand des resultierenden Speisebolus nach Zerkleinern eines genormten Nahrungsstücks analysiert. Das Zerkleinern geschah entweder in definierter Zeitspanne und mit definierter Anzahl von Kaubewegungen oder bis zur subjektiven Schluckbereitschaft. Alternativ bietet sich auch eine Bewertung des Endzustandes des Speisebolus an, welcher für eine unschädliche und gefahrlose Passierung des Aerodigestivtraktes eine glatte, elastische und kohäsive Konsistenz benötigt. Da in jüngeren Studien (Woda et al. 2006b) sich die Größenverhältnisse der schluckbereiten Speisepartikel bei jungen gesunden Probanden nur geringfügig unterschieden, während die Unterschiede bei den Kaufunktionsparametern beträchtlich sind, folgte Woda, dass die unmittelbar vor dem Schluckakt gemessenen Partikelgrößen ein geeigneter Indikator für die Leistungsfähigkeit der Kaufunktionseinheit sind.

Einen anderen Aspekt stellen bei Woda die Wechselwirkungen zwischen funktionellen Zahnkontakten, Okklusionsstabilität und Schliffflächen bzw. -marken dar. Stark abgeriebene Okklusionsflächen aus der menschlichen Frühzeit und dem Altertum deuten bereits darauf hin, dass beim Kauen starke Kräfte frei werden (Woda 2005). Bei forcierter Zahn-auf-Zahn-Führung entstehen Abriebfacetten, die den Kiefer bei den okkludierenden Kaubewegungen führen. Die Richtung der Kieferbewegungen variiert hierbei, was sowohl telemetrische Aufzeichnungen der okkludierenden Kaubewegungen als auch Abriebspuren der unteren Molaren an den Okklusionsflächen der oberen Molaren zeigen, welche kreuz und quer verlaufen. Diese Ergebnisse entsprechen nicht einer mechanischen Sichtweise, sondern eher früheren Beschreibungen, nach denen die Nahrung wie von einem Stößel in einem Mörser gleichsam zerdrückt wird. Seit früheren Kulturen deutet nichts darauf hin, dass sich die menschliche Physiologie verändert hat. Auch in modernen Industriestaaten zeigen selbst Menschen mit gesunden Gebissen an allen Zähnen Schlifffacetten. Hinzu kommen unphysiologische chemische Einflüsse, die das Zahnhartgewebe beträchtlich reduzieren können (Woda 2005).

Zahnabrieb kann durch Hypereruption kompensiert werden (Levers und Darling 1983; Murphy 1968). Unklar ist, ob diese Hypereruption exakt die reduzierte Kronenlänge ausgleicht. Außerdem wurde an einer Studienpopulation finnischer Frauen eine Bisserrhöhung im Alter beobachtet (Tallgren 1957), welche mit spontanem Knochenwachstum unabhängig vom Zahnabrieb erklärt wurde. Diese unterschiedlichen Prozesse, Knochenwachstum, anhaltende Zahneruption sowie Kaukräfte, die gleichzeitig sowohl Zahnabrieb verursachen als auch den Knochen stimulieren, müssen noch eingehender auf ihre Wechselwirkungen hin untersucht werden (Woda 2005).

1.5 Aufzeichnung von Kau- und Grenzbewegungen

Wenn man gezwungen ist, eine therapeutische Okklusion herzustellen, z.B. bei der Anfertigung von Total- oder Teilprothesen, Brücken, Kronen oder okklusalen Füllungen, übt man unter Umständen ungewollten Einfluss auf die gesamte Funktion des stomatognathen Systems aus. Dies wiederum kann sich auf die Verdauung und den Stoffwechsel auswirken (siehe Kapitel 1.1).

Das stomatognathe System wird unter orthofunktionellen Bedingungen arbeiten, wenn es gelingt, das Zusammenspiel zwischen Form und Funktion harmonisch zu gestalten. Andernfalls wird daraus eine Pathofunktionssituation resultieren. Die Vermeidung dysfunktionsbedingter Leiden und iatrogener Schäden im stomatognathen System ist deshalb eng verbunden mit der Gestaltung einer akzeptablen Form-Funktions-Relation.

Aus diesen Gründen hat die Aufzeichnung und Analyse der Bewegungsfunktion des Unterkiefers, mindestens zu Dokumentationszwecken, in den letzten Jahrzehnten stark an Bedeutung gewonnen. Dabei werden Funktions- und Bewegungsanalyse in folgender Weise unterschieden:

Die Einsatzgebiete der instrumentellen Funktionsanalyse liegen zum einen in der Einstellung bzw. „Programmierung“ von Artikulatoren für restaurative Zwecke, z.B. der Bestimmung von sagittalem Kondylenbahnwinkel, Bennettwinkel, dem Immediate Sideshift oder der Frontführung etc. Zum anderen unterliegen die bisherigen Einsatzgebiete der instrumentellen Funktionsanalyse einer funktionsanalytischen Ausrichtung, speziell für die Beurteilung der kondylären Bewegungsfunktion, um so Aussagen über mögliche Struktur-Funktions-Zusammenhänge treffen zu können, z.B. bei Diskusverlagerungen.

Hierzu bedient man sich traditionell der Achsiographie in ihrer mechanischen oder elektronischen Variante. Beispiele hierfür sind der Axiograph III oder das Axiotron-System (Fa. SAM, München). Das Axiotron-System baut auf Entwicklungen von Mack und Mitarbeitern auf (Mack 1980).

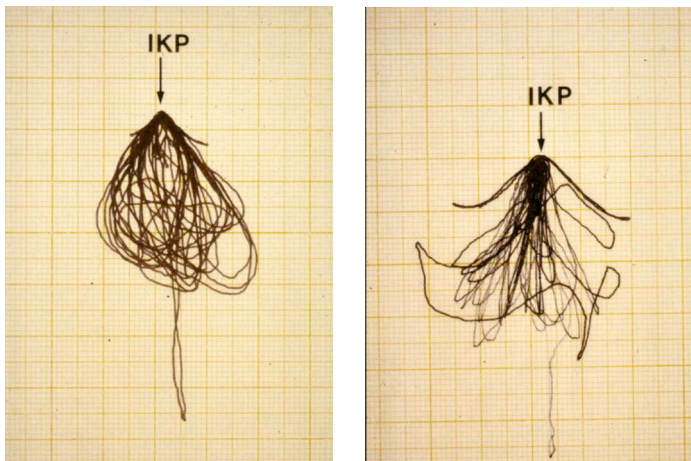


Abb. 1: Kauvorgang bei Weingummi (links) und bei Kartoffelchips (rechts)

Als weitere Beispiele für mechanische oder elektronische Achsiographie-Instrumente bzw. mechanische Basisgeräte mit elektronischem Zusatzgerät sollen an dieser Stelle das SAS(Scharnier-Achs-Schreib)-System von Meyer und Dal Ri (Meyer und dal Ri 1985) genannt werden, ferner das CADIAX(Computer-aided

diagnostic axis recording)-System der Firma Gamma (Klosterneuburg/Österreich), welches ursprünglich am mechanischen SAM-Axiographen angebracht wurde (Piehslinger et al. 1991; Slavicek 1988), das String-Condylcomp-LR3-System der Firma Dentrion (Höchberg), welches auf Entwicklungen der Messmethodik von Klett zurückgeht (Klett 1982), und schließlich das Compugnath-System der Firma Girrbach (Pforzheim), das auf dem von Luckenbach vorgestellten ECR(elektronisches computergesteuertes Registrier)-System basiert (Luckenbach 1983).

Bei der instrumentellen Bewegungsanalyse kann neben der Bewegungsaufzeichnung und Auswertung von Kondylenbahnen auch die Aufzeichnung der Bewegungen des unteren Inzisalpunktes herangezogen werden, und zwar zu Zwecken der neuromuskulären Diagnostik und der Kauanalyse. Beispielhaft hierfür sei der Sirognathograph von der Firma Siemens genannt, der

durch die Befestigung eines kleinen Stabmagneten an der Unterkiefer-Front das orale Empfinden nur minimal beeinträchtigt.

Abb. 1 zeigt die Bewegungsaufzeichnungen des Inzisalpunktes beim Sirognathographen für den Kauvorgang bei Weingummi und Kartoffelchips, sowie für zahngeführte Seitwärtsbewegungen. Es ergeben sich sehr variantenreiche Kauzyklen, die bei Weingummi ausladend schleifenförmig, bei Chips eher linienförmig erscheinen.

Auf einem moderneren Prinzip für die Aufzeichnung von Kau- und Grenzbewegungen beruht das „Jaw Motion Analyzer“(JMA)-System. Es arbeitet berührungslos auf der Basis der Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen und benutzt extrem leichte Sensoren. Das JMA-System der Firma Zebris (Isny/Allgäu) ist eine Weiterentwicklung des von der Firma Dr. Hansen & Co. (Bonn) hergestellten MT(Messtechnik)-1602-Systems und wird über die parallele Schnittstelle eines IBM-kompatiblen Computers betrieben (Hugger 1997).

Bei der neuesten Weiterentwicklung des JMA-Systems wurden zur besseren Vermeidung von Messfehlern das Gewicht des Gesichtsbogens und die Gewichtsbelastung des Unterkiefers weiter verringert. Die Form der Unterkiefer-Sender-Sensorik wurde halbkreis- bzw. bogenförmig an die des Gesichtsbogens angepasst und ausgebreitet. Außerdem hat das System nun eine USB-Schnittstelle zum PC und kann unter Windows XP betrieben werden.

2 Problemstellung

Mit den heute zur Verfügung stehenden elektronischen Messsystemen ist eine genaue quantitative Erfassung und Dokumentation von funktions- bzw. bewegungsbezogenen Parametern möglich. Die erhobenen Messwerte können zur Artikulatoreinstellung verwendet und weiterverarbeitet werden. In der vorliegenden Arbeit wurde ein besonderes Augenmerk auf die Kaufunktion im Okklusalbereich gelegt. Es stellte sich die Frage, ob und inwieweit sich Führungswinkel zahngeführter Grenzbewegungen, welche bisher für die Artikulatorjustierung herangezogen wurden, von Winkeln bei Kaubewegungen unterscheiden. Im Zuge dessen wurde die Fragestellung aufgeworfen, welche Werte unter Berücksichtigung der heutigen Mess-Möglichkeiten, insbesondere der des Jaw Motion Analyzers, besser für die Artikulatoreinstellung bzw. Herstellung von Zahnersatz geeignet sind.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Führungswinkel bzw. initiale Bahn-Winkel von zahngeführten Grenzbewegungen und Kaubewegungen in drei Ebenen zu vergleichen. Dabei sollte vom sogenannten „Schlussbiss“ ausgegangen und der jeweilige Winkel an einer Horizontalen in der jeweiligen Projektion gemessen werden. Die Ergebnisse sollten auf eventuelle Konsequenzen in der Praxis - beispielsweise der Artikulatoreinstellung bei der Herstellung von Zahnersatz – hinweisen und auf die Praxistauglichkeit moderner Aufzeichnungssysteme aufmerksam machen.

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsaufbau

3.1.1 Probanden

Die Untersuchungen mit dem JMA-System wurden an 39 Probanden durchgeführt. Davon waren 16 männlich und 23 weiblich, das Durchschnittsalter betrug 28 Jahre. Alle Probanden zeichneten sich dadurch aus, dass subjektiv keine Funktionsstörungen und nur bei einigen Personen Gelenkgeräusche vorhanden waren. Es wurden keine auffälligen Dyskoordinationen oder Limitationen festgestellt, und es bestand bei keinem Probanden die Notwendigkeit für herausnehmbaren Zahnersatz.

3.1.2 Geräte und Software

Für die vorliegende Arbeit wurde die Grundversion des bereits in Kapitel 1.5 erwähnten JMA-Systems verwendet.



Abb. 2: Angelegte JMA-Apparatur an einer Probandin

Bei diesem System werden drei Ultraschallsender und vier Ultraschallempfänger zur Erfassung aller rotativen und translativen Komponenten der Unterkieferbewegung verwendet. Abb. 2 zeigt eine angelegte JMA-Apparatur an einer Probandin.

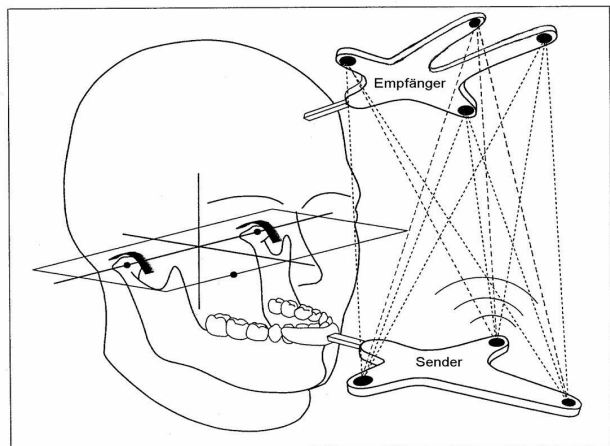


Abb. 3: Schematische Positionierung von Sender

Die Ultraschallelemente sind zu Sensoren zusammengefasst, wobei der obere Referenzsensor ähnlich einem modifizierten Gesichtsbogen bzw. Transferbogen dreipunktgestützt glabellär und jeweils retroaurikulär am Kopf des Patienten angebracht wird. Der untere Messsensor wird mit Hilfe eines T-Attachements paraokklusal an den Frontzähnen des beweglichen Unterkiefers befestigt. Die definierte geometrische Anordnung der Sensoren ist für die Koordinatenberechnung und zur iterativen Korrektur von Umweltbedingungen notwendig. Abb. 3 zeigt die schematische Positionierung von Sender- und Empfängerteil des JMA am Probanden und das daraus resultierende virtuelle Koordinatensystem.

Die Apparatur wird über eine Elektronik-Steuerungseinheit an einen Computer angeschlossen, auf dem die eigens für Zwecke der Ultraschall-Laufzeitmessung programmierte Software „WinJaw“ (Zebis) installiert sein muss. In der vorliegenden Arbeit wurde WinJaw in der Software-Version 10.5.29 verwendet.

Der Infraorbitalpunkt und die Scharnierachspunkte werden auf der Hautoberfläche mit einem speziellen Zeigesensor festgehalten, um damit softwaregestützt das Referenzsystem festzulegen. Der Ursprung des Koordinatensystems wird softwareseitig automatisch im Mittelpunkt der Verbindungsstrecke zwischen beiden arbiträren Achsenpunkten festgelegt (siehe Abb. 3). Beliebige andere Messpunkte können ebenfalls mit dem Zeigesensor bestimmt und für das gewählte

Bezugssystem berechnet werden. Mit einem Artikulator-Modul ist es auch nachträglich noch möglich, am einartikulierten Modell charakteristische Punkte, z.B. an Zahnhöckern, mit dem Zeigesensor abzugreifen.

Die am Probanden durchgeführten Laufzeitmessungen setzt die Software am Bildschirm in sichtbare, rechnerisch dreidimensionale Bewegungsbahnen um. Softwareseitig ist nicht nur die Berechnung von Kondylenpunkten und deren Bewegungsbahnen möglich, sondern auch die Bahndarstellung der mit Hilfe des Taststiftes über das Artikulator-Modul markierten Punkte. Menügeführt besteht die Möglichkeit, Werte zur Programmierung verschiedener Artikulatoren, inklusive Interkondylarabstand, zu erhalten. Optional können die gewonnenen Werte in Korrelation zu entsprechenden EMG-Daten analysiert werden. Des Weiteren werden Software und Messwertaufnehmer zur Funktionsanalyse der Halswirbelsäule und auch zur Körperbewegungs- bzw. Ganganalyse angeboten.

3.2 Methoden

Bei jedem Probanden wurde zunächst die Apparatur angelegt (siehe Abb. 2) und die arbiträren Achsenpunkte sowie der linke untere Orbitalpunkt auf der Haut markiert. Diese Referenzpunkte wurden nun mit Hilfe des speziellen Zeigestiftes und der Digitizer-Funktion von der WinJaw-Software in das virtuelle dreidimensionale Koordinatensystem übertragen, wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Aus den drei oben genannten Punkten wurde von WinJaw automatisch ein Bonwill-Dreieck erzeugt und angezeigt. Für die Messung musste nun ein Bissbehelf an die vestibulären Flächen der Unterkiefer-Frontzähne angeklebt werden, an welchem der Sender über eine Magnethalterung arretiert und fixiert wurde (siehe Abb. 2 und Abb. 3).

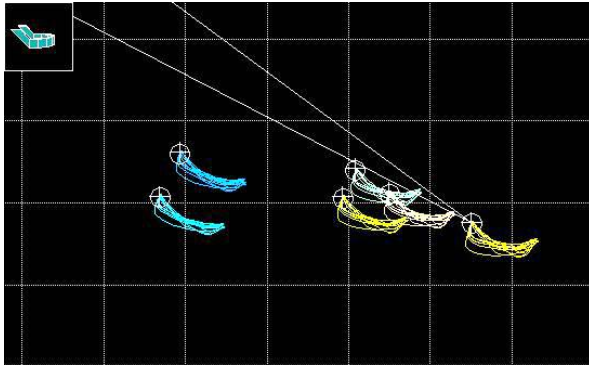


Abb. 4: WinJaw-Screenshot der rein zahngeführten Vorschubbewegung mit angezeigten Bewegungsbahnen der hinzugefügten individuellen Messpunkte in schräger Sagittal-Ansicht

Danach bestand die eigentliche Messsequenz aus folgenden Elementen: Öffnen und Schließen, rein zahngeführte Vor- und Seitschubbewegungen, sagittale und frontale Grenzbewegungen und freies Kauen mit Weingummi standardisierter Konsistenz, Form und

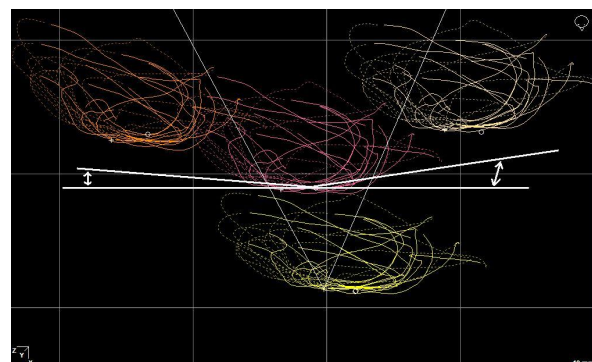
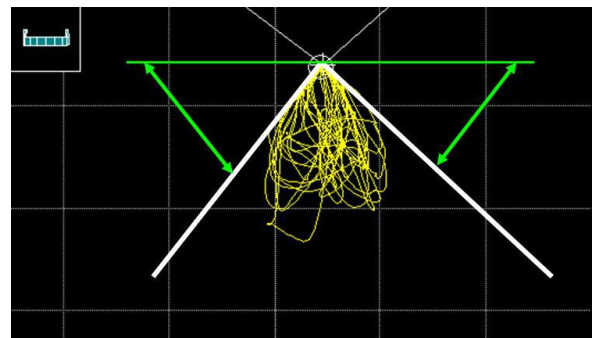
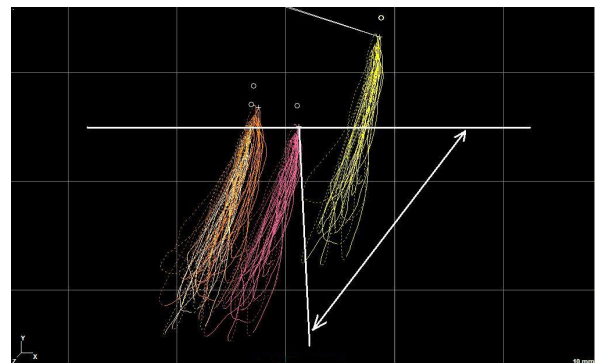


Abb. 5: Messung des initialen Tangentenwinkels des freien Kauens in der Sagittalebene (oben), Frontalebene (mitte) und

Größe. Bei jeder einzelnen Messung war der Schlussbiss die Ausgangsposition der

Bewegungsaufzeichnungen. Anschließend folgte die Übertragung der zuvor hergestellten Probanden-Gipsmodelle mittels Gesichtsbogen in den Artikulator. Die Unterkiefer-Koordinaten der zentralen Gruben der 6-Jahr-Molaren, der Kuspidal-Punkte der Eckzähne und des unteren Inzisivenpunktes wurden wiederum mit der Digitizer-Funktion des JMA bestimmt, indem die Messsensoren des JMA-Systems an den Artikulator (Protar-7, Fa. KaVo) befestigt wurden, und einzeln zu jedem Probanden-Datensatz zusätzlich abgespeichert. Aus diesen sich individuell ergebenden Koordinaten wurden ferner Koordinaten-Mittelwerte für jeden der fünf Messpunkte über alle Individuen gebildet. Individuelle und mittelwertige Koordinaten dienten als Ausgangspunkt für die Berechnung okklusaler Bewegungsbahnen, die mit Hilfe der WinJaw-Software für jeden Probanden auf der Grundlage der personenbezogenen Aufzeichnungen erfolgte. Dies geschah softwareseitig automatisch, so dass nach Eingabe einer Koordinate in WinJaw direkt der Punkt mit der dazugehörigen rechnerisch dreidimensionalen Bewegungsbahn angezeigt wurde (s. Abb. 4).

Mit der Winkelmessfunktion der Software WinJaw folgte nun die Messung der Konturwinkel der zahngeführten Grenzbewegungen sowie von Kaubewegungen, jeweils in der Sagittal-, Frontal-, und Horizontalebene in der individuellen und in der standardisierten bzw. Mittelwert-Version. Hierbei wurde zunächst jeweils eine horizontale Gerade in der Ebene gezogen und eine zweite Gerade an den exkursiven Anteil der angezeigten Bewegungsbahn angelegt, welche durch deren Startpunkt verlief. Dies geschah in der Weise, dass diese zweite Gerade über eine jeweils möglichst lange Strecke eine Tangente der Bewegungsbahn darstellte (Abb. 5). Im Folgenden wird dies als der initiale Tangentenwinkel bezeichnet, da hier der initiale Teil des exkursiven Bewegungsbahnanteils betrachtet wurde. Die ausgegebenen Werte wurden zur besseren Auswertung in Excel-Tabellen übertragen.

Abb. 4 und Abb. 5 zeigen Bildschirm-Ausschnitte aus dem Programm WinJaw, die die verschiedenen Messungen visualisieren, in Abb. 4 bei zahngeführter

Vorschubbewegung in der Sagittalebene und in Abb. 5 beim freien Kauen in der Sagittal,- Frontal- und Horizontalebene. Die unterschiedlichen Koordinaten der Zahnpositionen sind bereits eingegeben, und die errechneten Bewegungsbahnen werden angezeigt.

3.3 Statistische Auswertung

Die gemessenen Winkel wurden in Excel-Tabellen zusammengetragen, in die Statistik-Software SPSS in der Version 14.0 importiert und dort ausgewertet.

Um abzuklären, ob sich die Bewegungsbahnen der mittelwertigen Koordinaten von denen der individuellen Koordinaten signifikant unterscheiden, wurden vor Beginn der eigentlichen statistischen Auswertung die Messwerte jedes Probanden der Gruppe der individuell übertragenen Punkte mit den Messwerten jedes Probanden der Gruppe der standardisierten Koordinaten verglichen.

Danach wurde zunächst mit Hilfe einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA, *ANalysis Of VAriance*) versucht, die Daten der individuellen Messreihen für freies Kauen und die jeweiligen zahngeführten Grenzbewegungen systematisch zu vergleichen. In der weiteren Betrachtung erwies sich die ANOVA jedoch als zu empfindlich gegenüber Ausreißern. Jene konnten nicht in Übereinstimmung mit bzw. Korrelation zu etwaigen Besonderheiten an den Gebissen der einzelnen Probanden, z.B. Kreuzbiss, Tiefbiss, etc., gebracht werden. Daher wurde für die vorliegenden Untersuchungen das Verfahren der Rangtests gewählt.

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ist ein statistischer Test für die Häufigkeitsverteilung gepaarter Stichproben. Im Anwendungsbereich ergänzt er den Vorzeichentest, da er nicht nur die Richtung der Differenzen, sondern auch die

Stärke der Differenzen zwischen zwei gepaarten Stichproben berücksichtigt. Der hier vorgestellte Test ist unabhängig vom Verteilungstyp und wird daher als nichtparametrisch bezeichnet.

Für die vorliegende Arbeit wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest in jeder Ebene auf jeder Seite für jeden Messpunkt über jeweils alle Probanden durchgeführt. Zusätzlich wurden zur Verifizierung bzw. Verdeutlichung nicht nur die Messwerte im Vergleich, sondern auch deren Differenzen in Boxplot-Darstellungen eingebettet.

3.3.1 Der Boxplot

Der Boxplot, auch „Box-Whisker-Plot“, ist ein Diagramm, das zur graphischen Darstellung einer Reihe numerischer Daten verwendet wird. Er fasst verschiedene Maße der zentralen Tendenz, Streuung und Schiefe in einem Diagramm zusammen. Alle Werte der Fünf-Punkte-Zusammenfassung, also der Median, die zwei Quartile und die beiden Extremwerte, sind dargestellt. Als Box wird das durch die Quartile bestimmte Rechteck bezeichnet. Sie umfasst 50% der Daten. Durch die Länge der Box ist der Interquartilsabstand (interquartile range, IQR) abzulesen. Dies ist ein Maß der Streuung, welches durch die Differenz des oberen und unteren Quartils bestimmt ist. Weiterhin ist der Median in der Box eingezeichnet, welcher durch seine Lage innerhalb der Box einen Eindruck von der Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung vermittelt. Als Whisker werden die vertikalen Linien bezeichnet. In der Literatur finden sich drei verschiedene Definitionen für die Länge der Whisker. Bei der hier verwendeten Variante beträgt die Länge der Whisker maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstands ($1,5 \times \text{IQR}$) und wird immer durch einen Wert aus den Daten bestimmt. Werte, die über dieser Grenze liegen, werden separat in das Diagramm eingetragen und als Ausreißer bezeichnet. Gibt es keine Werte außerhalb der Whisker, so wird die Länge des Whiskers durch den maximalen bzw. minimalen Wert festgelegt. Häufig werden Ausreißer, die zwischen $1,5 \times \text{IQR}$ und $3 \times \text{IQR}$ liegen

als „milde“ Ausreißer bezeichnet und Werte, die über 3 x IQR liegen als „extreme“ Ausreißer. Diese werden dann auch unterschiedlich im Diagramm gekennzeichnet.

3.3.2 Statistische Signifikanz

In der Statistik heißen Unterschiede oder Zusammenhänge signifikant, wenn die Wahrscheinlichkeit gering ist, dass sie durch Zufall zustande gekommen sind. Die Überprüfung statistischer Signifikanz geschieht unter Anwendung der an das Datenmaterial angepassten Signifikanztests, die eine Abschätzung der Irrtumswahrscheinlichkeit erlauben. Das Quantil der maximal zulässigen geschätzten Irrtumswahrscheinlichkeit, das so genannte Signifikanzniveau, wird a priori festgelegt und oft mit „p“ oder „ α “ (alpha) bezeichnet, beispielsweise $\alpha \leq 0,05$ für maximal 5% zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit. Damit muss für ein statistisch signifikantes Ergebnis die errechnete Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0,05$ sein. Im hochsignifikanten Bereich befindet man sich schließlich mit Werten von $\alpha \leq 0,005$.

4 Ergebnisse

In der Sagittalebene war der Unterschied zwischen den Kauwinkeln und der initialen Protrusionsbahn mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha \leq 0,005$ eindeutig hochsignifikant. Bei den Ergebnissen in der Frontal- und Horizontalebene ergab sich die Notwendigkeit einer Differenzierung zwischen linker und rechter Seite bzw. Bewegungsrichtung.

4.1 Überprüfung der Messreihen

Die folgenden Abbildungen enthalten Kennzeichnungen der Abszisse, welche den Messpunkten entsprechen, z.B. „36“ (=Messpunkt an Zahn 36) oder „31/41“ (=Messpunkt am UK-Inzisivenpunkt).

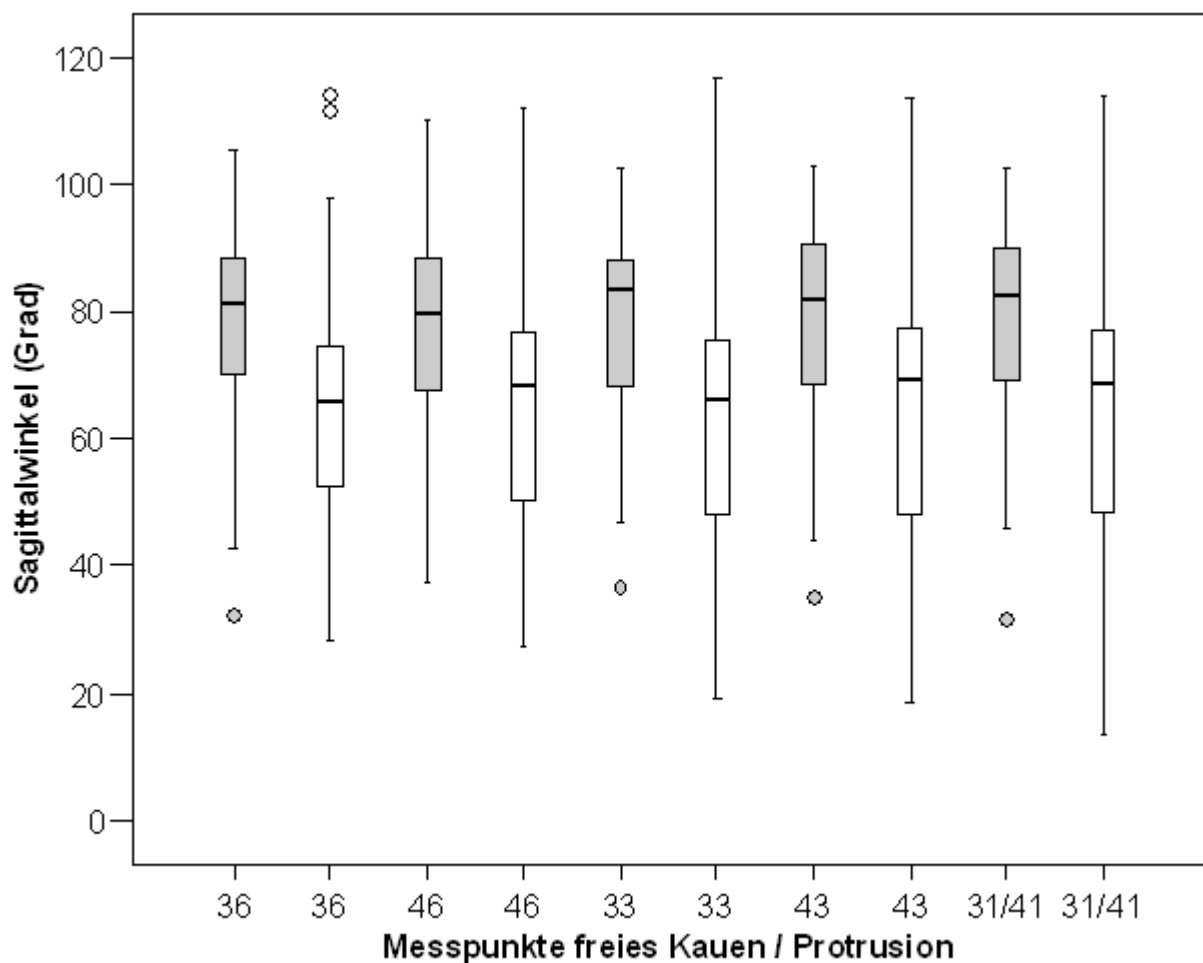


Abb. 6: Boxplot-Darstellung der Sagittalwinkel des freien Kauens (grau) und der Protrusion (weiß)

○ Ausreißer

Abb. 6 zeigt die Auswertung des Sagittalwinkels zunächst nur für die mittelwertigen Zahnpositionen in der sogenannten „Boxplot“- Darstellung, bei der 50% der Werte in die farbigen Boxen fallen. In diesem Diagramm ist bereits erkennbar, dass sich ein

deutlicher Unterschied zwischen den Winkeln der rein zahngeführten Bewegungen, hier weiß dargestellt, und den Winkeln des freien Kauens, grau dargestellt, ergab.

Die Gegenüberstellung der unabhängig voneinander aufgenommenen individuellen und standardisierten Messreihen (s. Kapitel 3.3 Abs. 2) werden zum Vergleich jeweils nebeneinander in der folgenden Tabelle 1 dargestellt. Stellvertretend sind in der Tabelle nur die Messwerte der Laterotrusion links in der Horizontalen bei den Messpunkten der Zähne 36, 46 und 33 enthalten:

Tabelle 1: Vergleich der individuellen und standardisierten Messreihen Z36: Messpunkt an Zahn 36 Z36av: standardisierter bzw. Durchschnitts-Messpunkt an Zahn 36 Durchschnittswert der entsprechenden Tabellenspalte AV: ho li:						
Proband	Z36 ho li	Z36av ho li	Z46 ho li	Z46av ho li	Z33 ho li	Z33av ho li
1	-13,0	-8,1	1,7	8,8	6,6	-4,1
2	50,6	36,9	57,9	44,1	48,2	44,8
3	-6,9	-5,0	18,7	23,9	-2,0	-0,1
4	-13,1	-14,7	7,5	4,7	-6,6	-8,9
5	9,8	9,0	27,8	26,6	11,6	10,5
6	-5,4	-19,6	10,0	-3,0	-1,8	-14,9
7	-8,7	-9,0	8,5	6,8	-4,3	-2,1
8	-24,1	-18,6	-5,5	-7,1	-13,8	-10,6
9	-20,7	-22,1	-8,1	-10,1	-14,3	-16,8
10	-1,4	2,4	0,2	4,0	-1,8	5,8
11	4,5	4,6	23,9	26,3	5,2	6,8
12	-1,0	1,7	21,2	21,0	3,3	7,8
13	-32,4	-24,7	-17,7	-13,9	-28,2	-16,9
14	-6,1	-4,7	7,0	8,5	1,6	-3,2
15	-15,4	-16,3	3,9	0,0	-9,1	-10,4
16	-6,8	-5,2	-15,2	-8,9	-7,7	-8,4
17	-17,9	-17,2	-1,9	-3,1	-12,9	-8,6
18	25,2	25,8	35,1	34,4	25,4	30,3
19	21,0	25,3	33,7	41,6	21,4	22,9
20	-21,2	-14,0	-0,2	6,8	-13,4	-10,0
21	0,1	0,4	21,6	20,6	4,0	4,7
22	-8,2	-7,5	-3,1	-3,8	-4,2	-3,4
23	-0,3	-1,2	21,7	14,8	2,9	5,6
24	10,7	11,4	21,9	21,7	13,7	12,4
25	-3,9	1,5	22,3	20,8	3,7	6,4
26	-6,9	-7,7	6,4	6,1	-4,3	-2,9

27	-14,4	-16,0	5,6	3,6	-7,4	-8,9
28	2,6	2,8	22,3	21,8	10,4	8,0
29	19,2	19,4	32,9	37,4	21,1	20,3
30	1,6	1,7	33,0	27,8	7,7	6,7
31	-14,0	-13,2	-3,8	-1,1	-9,3	-10,1
32	18,4	17,2	26,0	23,5	19,0	18,7
33	-15,7	-15,0	4,4	5,2	-9,1	-8,6
34	-14,3	-17,7	0,6	-3,5	-5,9	-15,0
35	1,5	0,9	16,2	17,5	4,7	7,0
36	-19,6	-21,7	-9,1	-5,6	-14,3	-17,0
37	10,3	14,8	33,7	36,1	16,5	13,3
38	-42,6	-45,0	-45,9	-42,8	-42,8	-45,0
39	9,2	9,5	32,6	32,7	9,1	11,5
AV	-3,7	-3,5	11,4	11,6	0,7	0,5

Die Ergebnisse der Wilcoxon-Rangtests für die einzelnen Messpunkte zeigten hier keine oder noch keine signifikanten Unterschiede (von $\alpha = 0,066$ bis $\alpha = 1,0$). Das bedeutet für die vorliegende Arbeit, dass sich die jeweiligen Bewegungsbahnen der mittelwertigen Koordinaten prinzipiell nicht oder nicht wesentlich von jenen der individuellen Koordinaten unterscheiden.

Ähnliche Tabellen mit demselben „Nicht“-Signifikanz-Niveau für Unterschiede bei Unterkieferbewegungen an individuellen und standardisierten Messpunkten ergaben sich sowohl bei der Laterotrusion in der Frontalebene als auch bei Protrusion in der Sagittalen. Im Folgenden wurden deshalb ausschließlich die Bahnwerte der individuellen Koordinaten verwendet.

4.2 Auswertung der Messreihen in der Sagittalebene

Nach der Überprüfung der Messreihen wurden die Differenzen bzw. vorhandene oder nicht vorhandene Unterschiede zwischen den Winkeln der zahngeführten Grenzbewegungen und des freien Kauens untersucht. Dazu wurden ausschließlich die Messreihen der individuellen Messpunkte verwendet. Die folgende Tabelle 2

enthält einen Teil der Vergleichsmessreihen von freiem Kauen mit der Protrusion in der Sagittalebene:

Tabelle 2: Vergleich des freien Kauens mit der Protrusion in der Sagittalebene 36: Messpunkt an Zahn 36 fk: freies Kauen Protrusion pro: AV:						
Proband	fk 36	pro 36	fk 46	pro 46	fk 33	pro 33
1	83,7	69,6	83,3	77,5	85,3	73,3
2	32,2	32,0	37,4	27,3	36,6	34,6
3	68,8	29,0	70,0	33,2	64,5	28,6
4	81,0	72,4	80,3	71,5	84,4	72,8
5	85,0	49,3	79,8	42,9	84,2	47,3
6	96,7	97,8	100,5	96,5	99,1	99,1
7	80,1	76,0	74,5	76,2	81,0	76,7
8	85,4	61,3	88,3	60,8	88,3	60,9
9	65,5	50,3	70,9	55,8	67,9	36,4
10	83,8	53,3	91,9	62,4	88,2	48,7
11	83,5	55,9	77,4	45,6	85,5	50,2
12	79,2	61,8	62,0	69,6	74,9	65,6
13	86,7	74,7	101,7	66,8	91,0	74,3
14	90,0	87,4	87,7	83,3	90,8	84,7
15	87,7	59,9	86,6	70,8	82,0	64,6
16	80,9	52,6	79,0	50,1	88,5	40,1
17	83,6	71,9	86,2	70,6	88,0	74,2
18	85,8	74,4	110,2	77,0	89,4	76,8
19	69,2	46,1	57,1	48,7	62,0	46,0
20	93,1	83,6	91,9	81,6	95,9	83,0
21	91,7	76,9	92,2	79,3	87,7	81,3
22	73,4	69,0	73,0	74,8	74,7	73,4
23	90,0	67,0	78,1	66,8	84,5	66,9
24	42,8	28,5	48,9	32,7	47,1	19,1
25	66,4	57,0	65,3	59,3	68,5	57,7
26	72,5	53,4	72,9	51,0	68,0	54,7
27	93,9	64,9	89,2	62,6	97,3	64,9
28	89,6	66,7	88,1	71,4	85,2	70,8
29	81,0	71,4	86,9	75,1	81,4	71,3
30	78,5	97,8	79,9	88,9	81,5	95,0
31	93,3	46,3	89,2	47,0	91,7	34,1
32	71,4	71,4	71,8	76,6	71,4	71,4
33	71,2	71,8	65,3	78,5	73,2	78,0
34	74,3	80,5	80,9	76,2	80,4	71,3
35	54,2	39,2	48,9	39,2	57,0	31,9
36	102,9	111,8	100,6	112,1	102,3	107,2
37	66,0	41,7	65,0	43,5	62,2	46,3
38	105,4	114,1	97,3	112,1	95,4	116,7
39	60,5	52,8	64,7	54,5	59,5	53,6
AV	78,5	65,0	78,5	65,7	78,9	64,0

Aus der Tabelle 2 geht hervor, dass die Wilcoxon-Rangtests für den Vergleich des freien Kauens mit den Grenzbewegungen in der Sagittalebene hochsignifikante Unterschiede zeigten (bei jedem Messpunkt $\alpha < 0,001$).

Das Ergebnis stimmt mit der folgenden Abb. 7 gut überein. Sie zeigt die gemessenen Winkel in der Sagittalebene in der sog. „Boxplot“-Darstellung, bei der 50% der Werte in die Boxen fallen. Aus diesem Diagramm ist erkennbar, dass sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Winkeln der rein zahngeführten Bewegungen, dargestellt durch weiße Boxen mit den niedrigeren Medianwerten, und den Winkeln des freien Kauens, dargestellt durch graue Boxen und höhere Medianwerte, ergab.

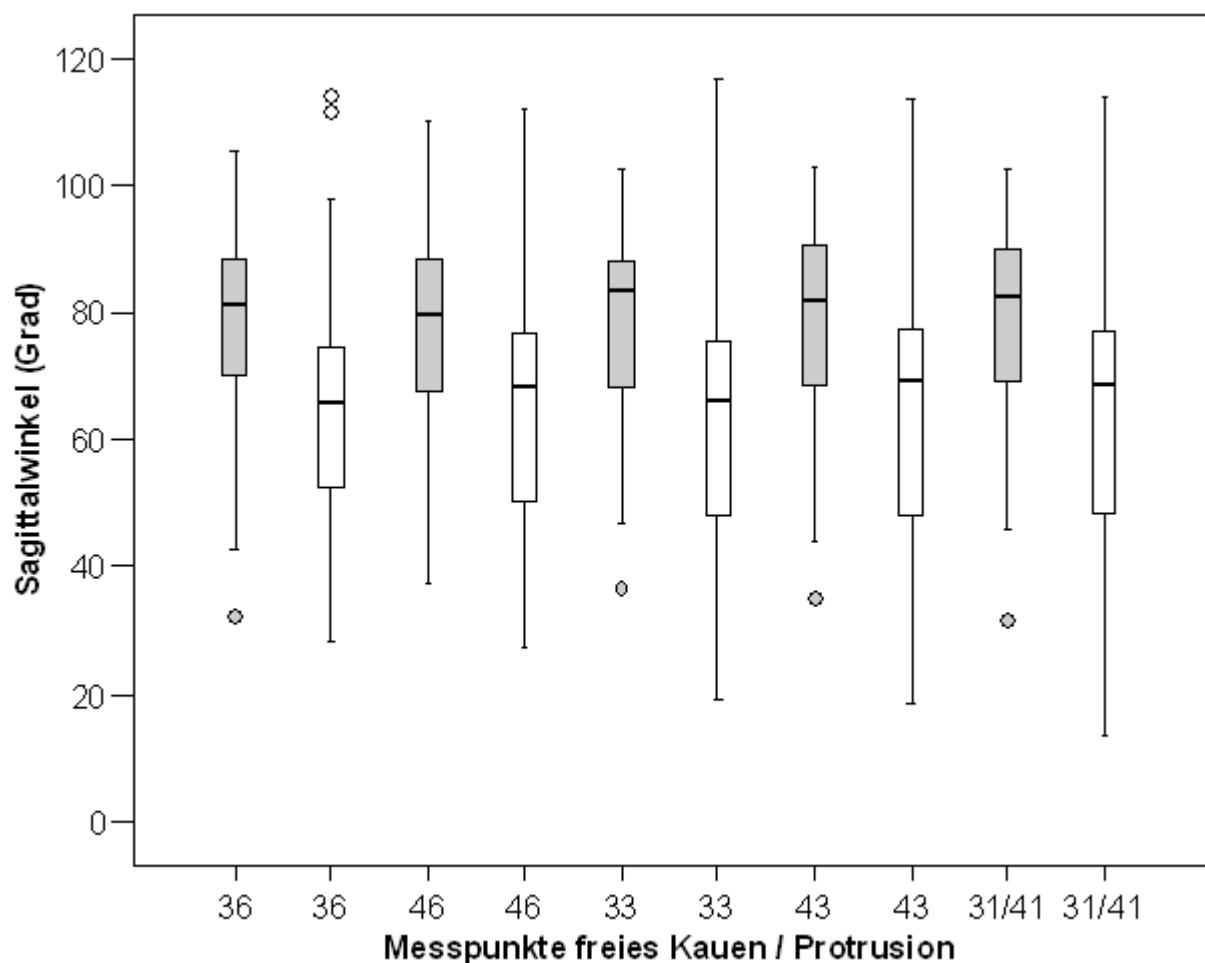


Abb. 7: Boxplot-Darstellung der Sagittalwinkel des freien Kauens (grau) und der Protrusion (weiß)

O Ausreißer

Mit einer Modifizierung der Boxplot-Darstellung, indem für jeden Messpunkt die Werte der zwei Bewegungsarten zu einer Differenz zusammengefasst wurden, konnten die Ergebnisse grafisch verdeutlicht und erhärtet werden (Abb. 8).

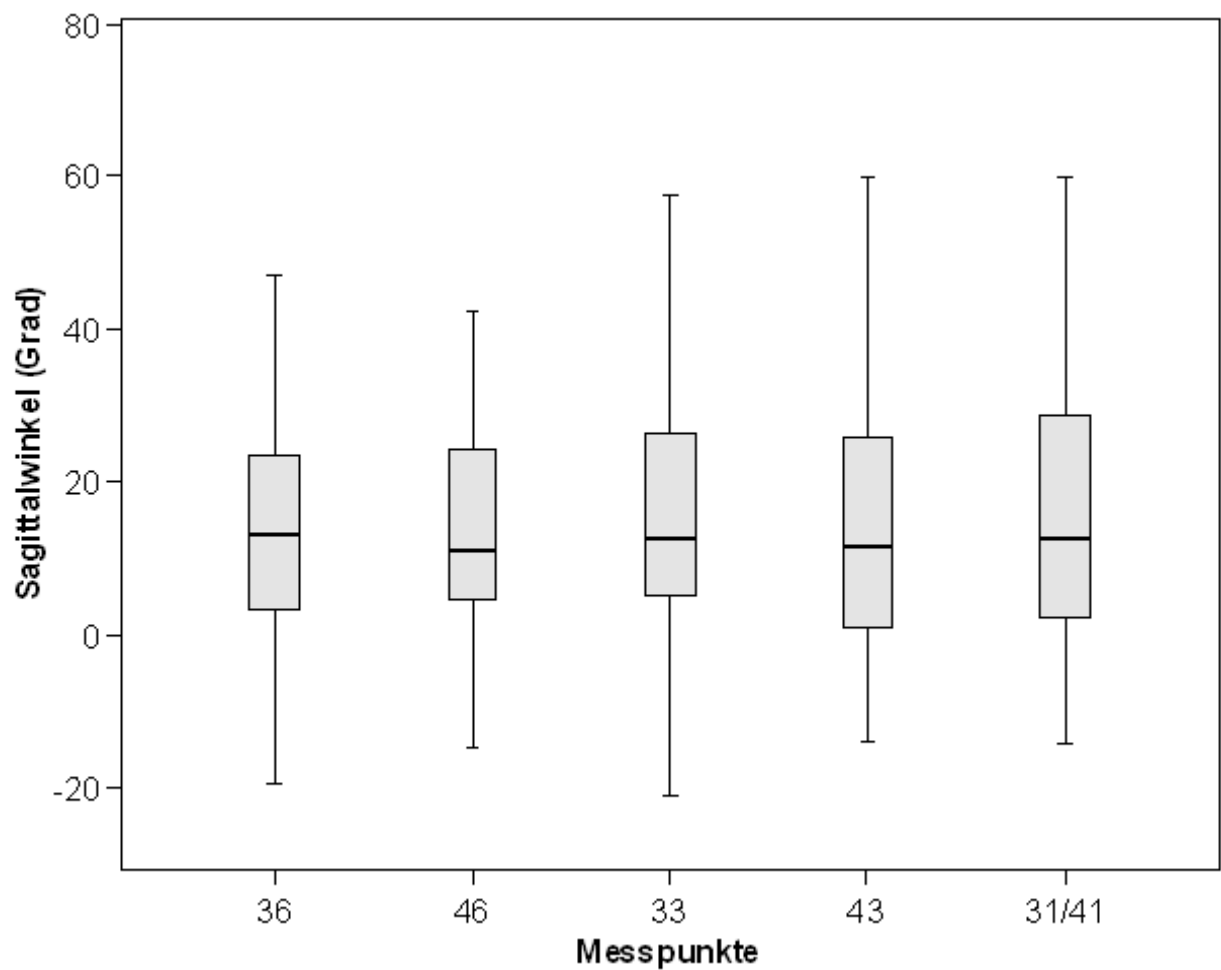


Abb. 8: Boxplot-Darstellung der Winkel-Differenzen des freien Kauens und der Protrusion in der Projektion auf die Sagittalebene

Die Mediane der Boxplots in Abb. 8 liegen alle im gleichen Bereich deutlich über Null. Damit werden die Unterschiede der Winkel des freien Kauens und der Protrusion in der Sagittalebene, wie bereits in Abb. 7 dargestellt, bestätigt.

4.3 Auswertung der Messreihen in der Frontalebene

Die folgenden Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen exemplarisch den Vergleich der initialen Tangentenwinkel bei Laterotrusion und freiem Kauen in der Frontalebene für die Messpunkte der Zähne 36, 46 und 33.

Tabelle 3: Vergleich des freien Kauens mit der Laterotrusion in der Frontalebene 36/46/33: Messpunkt an Zahn 36/46/33 fK: freies Kauen lat: Laterotrusion fr li: frontal links AV: Durchschnittswert der entsprechenden Tabellenspalte						
Proband	fK 36 fr li	lat 36 fr li	fK 46 fr li	lat 46 fr li	fK 33 fr li	lat 33 fr li
1	21,2	35,0	29,7	51,6	30,3	44,6
2	34,5	33,7	44,3	40,6	38,2	40,8
3	23,6	11,2	33,1	28,2	20,9	14,6
4	59,5	37,5	64,9	48,1	65,1	41,4
5	53,8	28,2	62,2	41,5	58,0	28,3
6	52,6	44,5	60,4	56,1	56,5	50,9
7	39,5	25,2	47,0	42,4	40,8	33,2
8	39,5	47,9	50,0	56,5	40,1	56,7
9	41,0	36,3	52,1	50,8	44,3	42,8
10	39,7	27,7	47,6	39,4	39,4	34,5
11	48,8	39,5	58,8	53,4	45,7	40,6
12	25,8	17,5	35,5	36,8	25,5	18,4
13	62,4	37,0	67,9	48,2	69,2	40,0
14	37,0	27,4	49,9	41,3	41,7	34,8
15	32,4	34,1	46,8	46,2	35,5	35,3
16	33,0	21,8	47,5	41,2	40,6	25,1
17	31,0	43,0	43,4	53,8	29,5	48,1
18	80,6	47,0	86,5	55,7	88,2	50,1
19	19,3	11,7	29,2	23,4	15,0	13,2
20	34,7	38,2	52,2	54,2	40,3	42,0
21	32,9	40,6	49,9	52,3	37,8	41,1
22	77,7	39,4	79,1	49,6	77,3	46,0
23	35,4	19,1	42,7	35,9	37,6	23,8
24	25,7	27,8	45,5	41,9	26,1	30,0
25	50,9	35,1	59,1	47,4	54,3	37,6
26	25,8	28,5	40,0	40,7	30,1	33,1
27	44,3	41,7	55,0	50,8	49,0	46,0
28	54,2	48,0	59,2	56,7	56,7	51,6
29	58,8	46,5	62,1	52,6	60,6	51,6
30	57,6	43,8	64,0	52,4	60,8	44,3
31	41,9	27,9	47,9	45,6	45,9	36,2
32	50,2	41,7	59,0	52,2	51,9	43,8
33	20,2	16,2	38,4	38,4	22,3	21,3

34	35,9	17,9	46,2	41,6	38,7	28,4
35	48,3	30,4	50,9	42,1	51,8	32,1
36	31,5	42,6	43,3	51,0	38,0	50,9
37	44,5	31,7	51,6	40,8	48,6	34,4
38	43,7	36,8	52,7	49,3	49,3	54,4
39	56,7	11,0	64,3	30,0	55,9	13,9
AV	42,2	32,6	51,8	45,7	45,1	37,3

Tabelle 4: Vergleich des freien Kauens mit der Laterotrusion in der Frontalebene

36/46/33: Messpunkt an Zahn 36/46/33

fK: freies Kauen

lat:

Laterotrusion

fr re:

frontal rechts

AV:

Durchschnittswert der entsprechenden Tabellenspalte

Proband	fK 36 fr re	lat 36 fr re	fK 46 fr re	lat 46 fr re	fK 33 fr re	lat 33 fr re
1	61,7	50,2	57,6	39,0	60,9	49,6
2	36,5	25,4	31,9	8,9	32,5	16,5
3	51,2	34,5	33,4	21,1	45,6	32,9
4	58,6	45,8	53,1	27,2	60,1	42,3
5	65,1	26,7	63,2	6,0	68,4	21,7
6	48,7	59,0	38,5	53,2	47,8	60,4
7	47,2	48,8	38,0	40,0	47,8	44,6
8	45,0	44,0	30,0	27,8	43,5	41,2
9	57,1	55,7	35,6	33,7	55,2	58,2
10	41,1	35,6	32,6	22,2	40,2	36,2
11	49,3	55,4	40,9	38,7	49,5	55,3
12	47,9	38,5	41,1	19,4	49,2	35,1
13	58,4	47,5	46,1	33,6	54,8	49,3
14	43,9	53,8	28,4	31,5	40,8	47,7
15	37,4	36,4	25,7	18,3	36,1	32,6
16	62,1	57,2	56,8	41,4	65,1	61,1
17	41,1	56,0	39,6	45,7	46,9	58,6
18	41,3	63,1	25,8	53,0	42,2	57,2
19	66,1	44,3	65,0	31,5	62,4	39,3
20	63,3	56,0	52,5	38,0	60,0	53,7
21	39,4	47,5	26,4	36,0	40,7	48,4
22	57,0	45,8	52,3	32,8	57,9	50,0
23	55,4	45,2	52,2	32,8	53,7	46,1
24	28,8	37,9	12,8	14,7	26,7	29,3
25	41,5	43,8	29,2	29,2	44,7	43,6
26	34,7	37,3	17,6	21,3	31,0	33,2
27	49,6	53,9	37,6	40,3	47,0	52,4
28	53,0	51,9	44,1	46,1	49,1	51,7
29	62,7	62,4	58,5	57,0	61,1	60,4
30	47,3	56,2	33,5	45,0	42,4	55,0
31	66,8	54,3	62,4	44,8	71,0	55,9
32	59,6	64,9	51,3	54,1	58,8	63,0

33	60,3	41,8	45,5	19,7	55,1	39,9
34	43,3	39,2	27,0	26,9	39,3	35,8
35	36,9	48,4	27,9	37,1	39,7	49,9
36	62,8	79,3	59,5	75,5	71,5	81,0
37	54,5	45,8	39,8	36,1	49,7	43,3
38	51,9	52,8	40,8	40,8	52,7	56,0
39	47,0	46,6	28,5	27,1	40,4	43,1
AV	50,7	48,4	40,6	34,6	49,8	47,0

Aus den Tabellen 3 und 4 geht folgendes hervor:

In der Projektion der Frontalebene existiert eine höhere Variation der Messwerte, vor allem, wenn man die linke und rechte Seite miteinander vergleicht. Die Wilcoxon-Rangtests zeigen hier Signifikanz-Werte für die linke Seite, die deutlich über dem Signifikanz-Niveau liegen (Messpunkt 43: $\alpha = 0,007$; Messpunkt 31/41: $\alpha = 0,01$) und bei den Messpunkten 36 ($\alpha < 0,001$), 46 ($\alpha < 0,001$) und 33 ($\alpha = 0,001$) sogar noch hochsignifikant sind. Für die rechte Seite wurde nur für den Messpunkt 46 das Signifikanz-Niveau knapp erreicht ($\alpha = 0,046$). Ansonsten waren auf der rechten Seite die Unterschiede der initialen Tangentenwinkel für Laterotrusion und für freies Kauen nicht signifikant (von $\alpha = 0,143$ bis $\alpha = 0,283$).

Die Boxplot-Darstellung der gemessenen Winkel in Abb. 9 veranschaulicht den

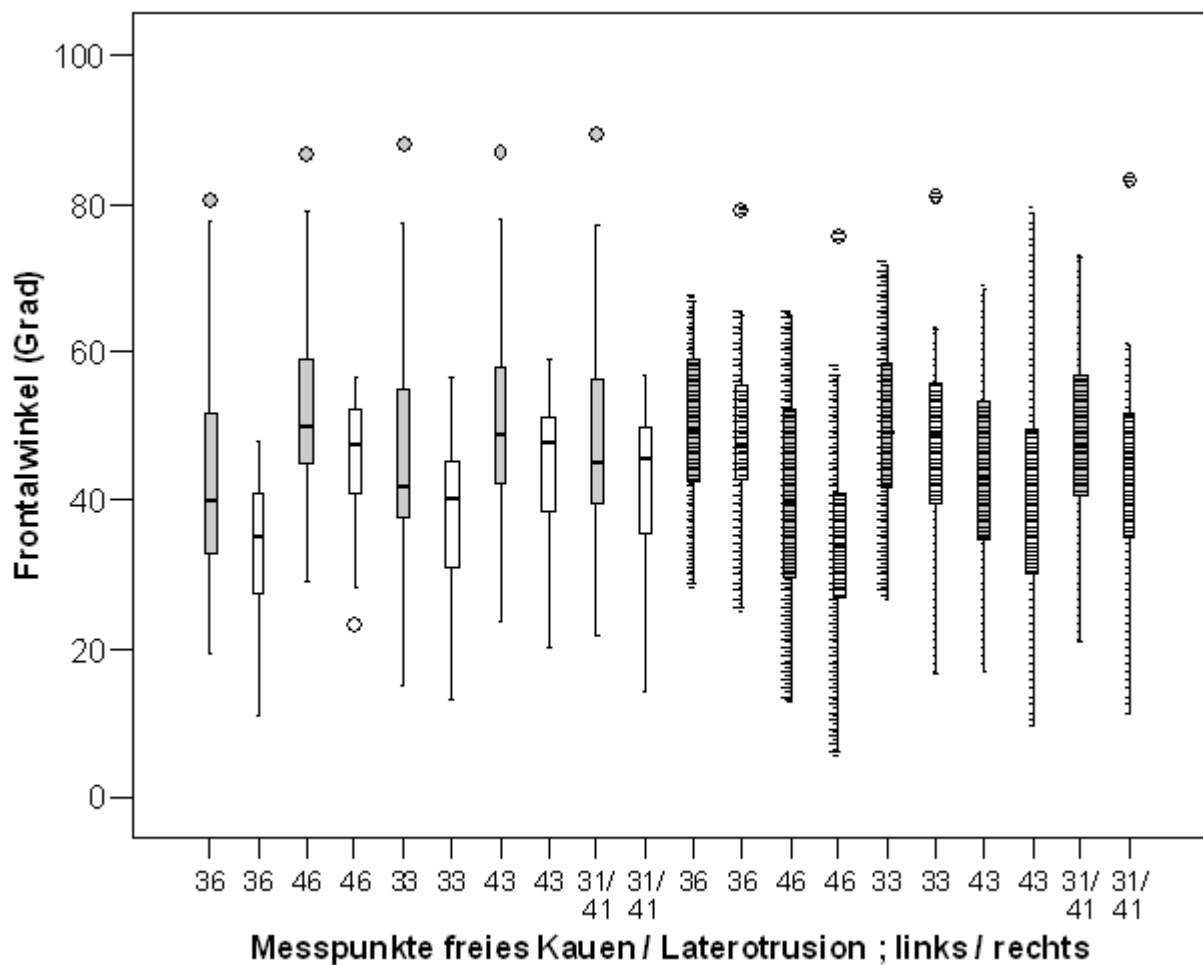


Abb. 9: Boxplot-Darstellung der Frontalwinkel des freien Kauens (grau) und der Laterotrusion (weiß) auf linker und rechter Seite (rechte Seite gepunktet)
 O Ausreißer

Unterschied der Frontalwinkel eines jeden Messpunktes im freien Kauen, im Diagramm grau unterlegt, und in der Laterotrusion für die linke und rechte Seite. Die rechte Seite wurde gepunktet dargestellt.

Die Boxplot-Darstellung der Differenzen in Abb. 10 zeigt, dass alle Mediane der Boxplots für die linke Seite, uni-grau dargestellt, von Null verschieden sind und über Null liegen und jene für die rechte Seite, gepunktet dargestellt, im Bereich um Null liegen. Aus dieser Abbildung ergibt sich, dass sich bei der Untersuchung der Frontalwinkel die Unterschiede des freien Kauens und der Laterotrusion eher auf der linken als auf der rechten Seite verifizieren lassen.

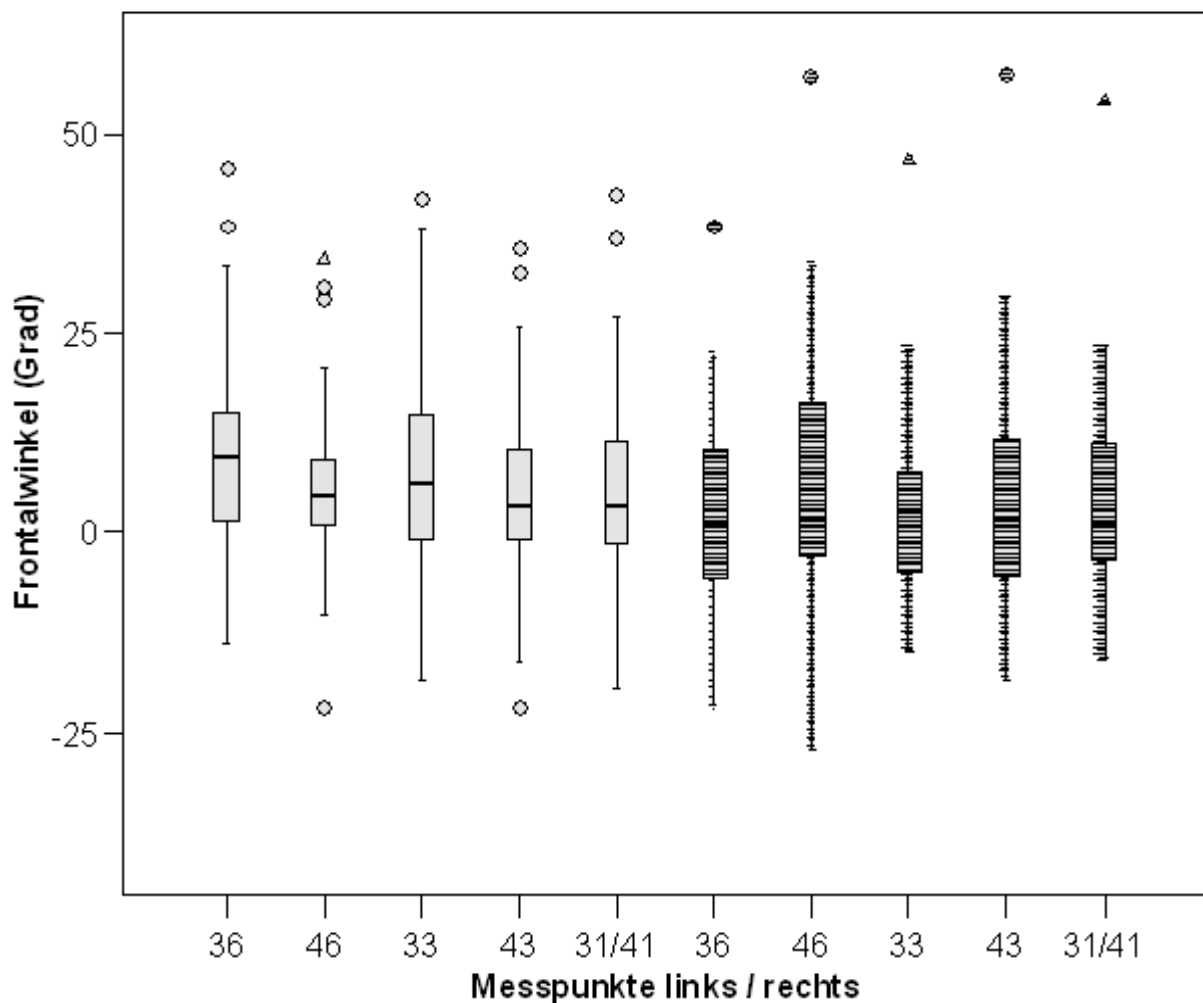


Abb. 10: Boxplot-Darstellung der Winkel-Differenzen des freien Kauens und der Laterotrusion in der Projektion der Frontalebene

- rechte Seite
- Ausreißer
- extreme Ausreißer

4.4 Auswertung der Messreihen in der Horizontalebene

Eine prinzipiell ähnliche Tendenz ergab sich für die Horizontalebene. Jedoch wiesen hier die Messwerte der rechtsseitigen Bewegungsrichtung die signifikanten Unterschiede auf. In Tabelle 5 sind die initialen Tangentenwinkel bei Laterotrusion und freiem Kauen in der Horizontalebene für den Bereich der Zähne 36, 46 und 33 zusammengestellt.

Proband	fK 36 ho li	lat 36 ho li	fK 46 ho li	lat 46 ho li	fK 33 ho li	lat 33 ho li
1	-9,8	-13,0	-5,8	1,7	-7,7	6,6
2	-53,4	50,6	-43,4	57,9	-45,2	48,2
3	-14,7	-6,9	16,9	18,7	-8,9	-2,0
4	20,7	-13,1	35,1	7,5	25,2	-6,6
5	6,1	9,8	19,7	27,8	6,8	11,6
6	-16,4	-5,4	-18,7	10,0	-14,5	-1,8
7	11,2	-8,7	32,4	8,5	18,6	-4,3
8	10,7	-24,1	22,6	-5,5	12,9	-13,8
9	36,7	-20,7	38,8	-8,1	31,8	-14,3
10	2,7	-1,4	13,2	0,2	0,3	-1,8
11	34,3	4,5	46,7	23,9	40,4	5,2
12	7,2	-1,0	24,6	21,2	9,6	3,3
13	8,7	-32,4	22,5	-17,7	18,4	-28,2
14	31,4	-6,1	48,1	7,0	27,2	1,6
15	-17,1	-15,4	-6,2	3,9	-14,4	-9,1
16	-12,4	-6,8	-10,9	-15,2	-12,0	-7,7
17	17,7	-17,9	40,3	-1,9	17,6	-12,9
18	-74,6	25,2	-77,2	35,1	-79,4	25,4
19	15,7	21,0	30,9	33,7	16,4	21,4
20	-17,6	-21,2	12,1	-0,2	-10,2	-13,4
21	1,0	0,1	20,3	21,6	0,9	4,0
22	-16,5	-8,2	-2,6	-3,1	-10,0	-4,2
23	-24,8	-0,3	-3,8	21,7	-19,0	2,9
24	6,6	10,7	17,9	21,9	4,8	13,7
25	26,5	-3,9	29,7	22,3	16,2	3,7
26	11,7	-6,9	25,1	6,4	12,0	-4,3
27	-19,7	-14,4	5,1	5,6	-11,3	-7,4
28	5,3	2,6	19,3	22,3	10,3	10,4
29	-28,0	19,2	-25,5	32,9	-22,7	21,1
30	-23,5	1,6	25,7	33,0	3,2	7,7
31	-29,0	-14,0	-19,4	-3,8	-22,6	-9,3
32	16,5	18,4	23,0	26,0	18,8	19,0
33	2,5	-15,7	28,4	4,4	7,2	-9,1
34	12,6	-14,3	13,8	0,6	14,7	-5,9
35	-27,1	1,5	-25,2	16,2	-31,4	4,7
36	-22,9	-19,6	-21,5	-9,1	-23,6	-14,3
37	22,3	10,3	35,8	33,7	31,6	16,5
38	-23,1	-42,6	-10,3	-45,9	-16,5	-42,8
39	4,5	9,2	26,3	32,6	13,9	9,1
AV	-3,0	-3,8	10,4	11,5	0,2	0,6

In der Horizontalebene ist die Variation der Werte deutlich höher. Die Wilcoxon-Rangtests liefern für alle Messpunkte in dieser Ebene nicht signifikante Ergebnisse (von $\alpha = 0,06$ bis $\alpha = 0,66$). Dennoch lässt sich für die Rechtslaterotrusion eine Tendenz zur Signifikanz erkennen (von $\alpha = 0,06$ bis $\alpha = 0,197$), während die α -Werte für die Linkslaterotrusion deutlicher im nicht signifikanten Bereich liegen (von $\alpha = 0,49$ bis $\alpha = 0,66$).

Die Boxplot-Darstellung in Abb. 11 liefert einen Überblick über die Winkel-Messungen in der Horizontalebene:

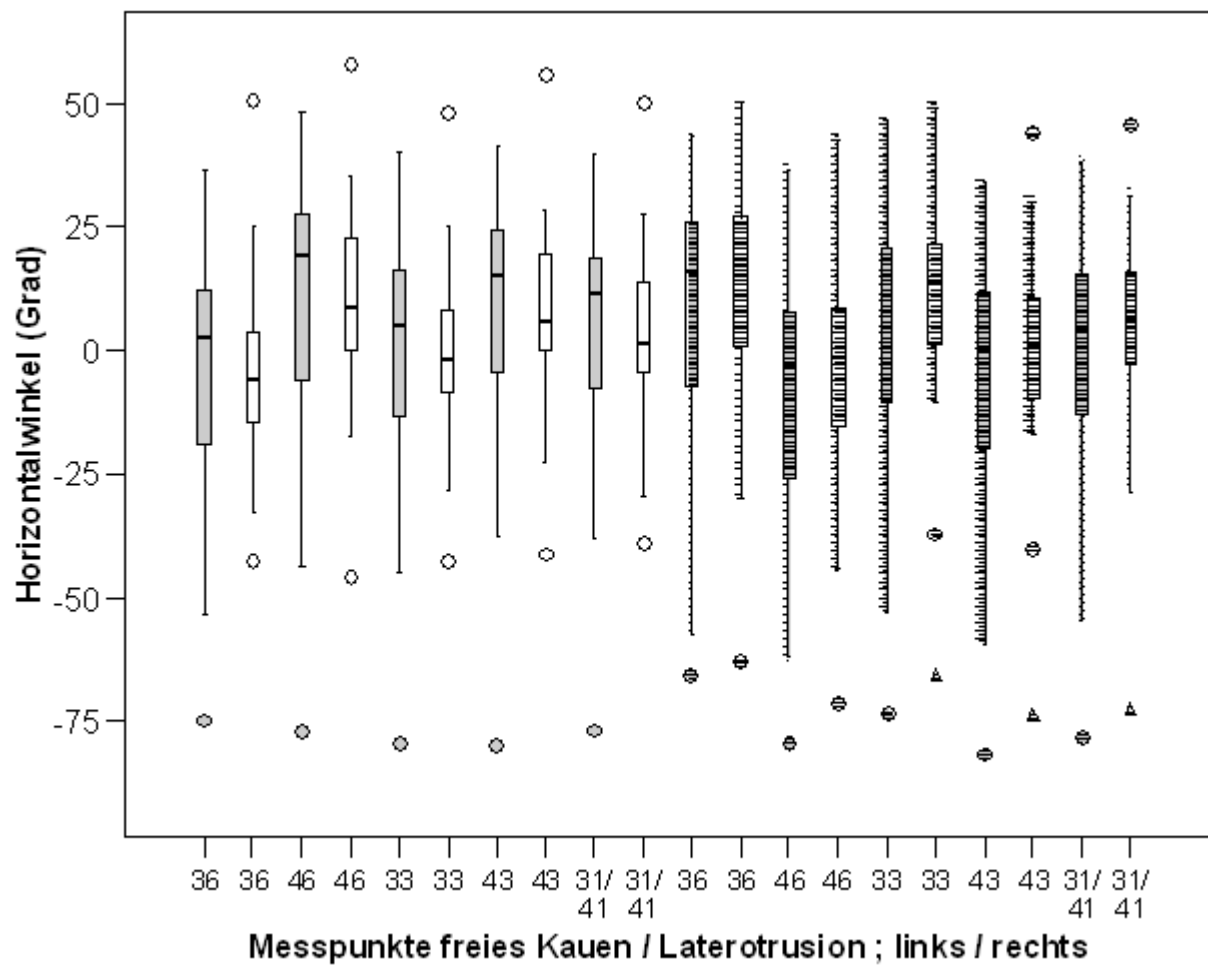


Abb. 11: Boxplot-Darstellung der Horizontalwinkel des freien Kauens (grau) und der Laterotrusion (weiß) auf linker und rechter Seite (rechte Seite gepunktet)

 rechte Seite
 O Ausreißer

Die Boxplot-Darstellung der Differenzen in Abb. 12, bei denen die Messwerte bei freiem Kauen und bei Laterotrusion für jeden Messpunkt voneinander subtrahiert bzw. als Differenz in einem Wert zusammengefasst wurden, verdeutlicht die Unterschiede im Seitenvergleich:

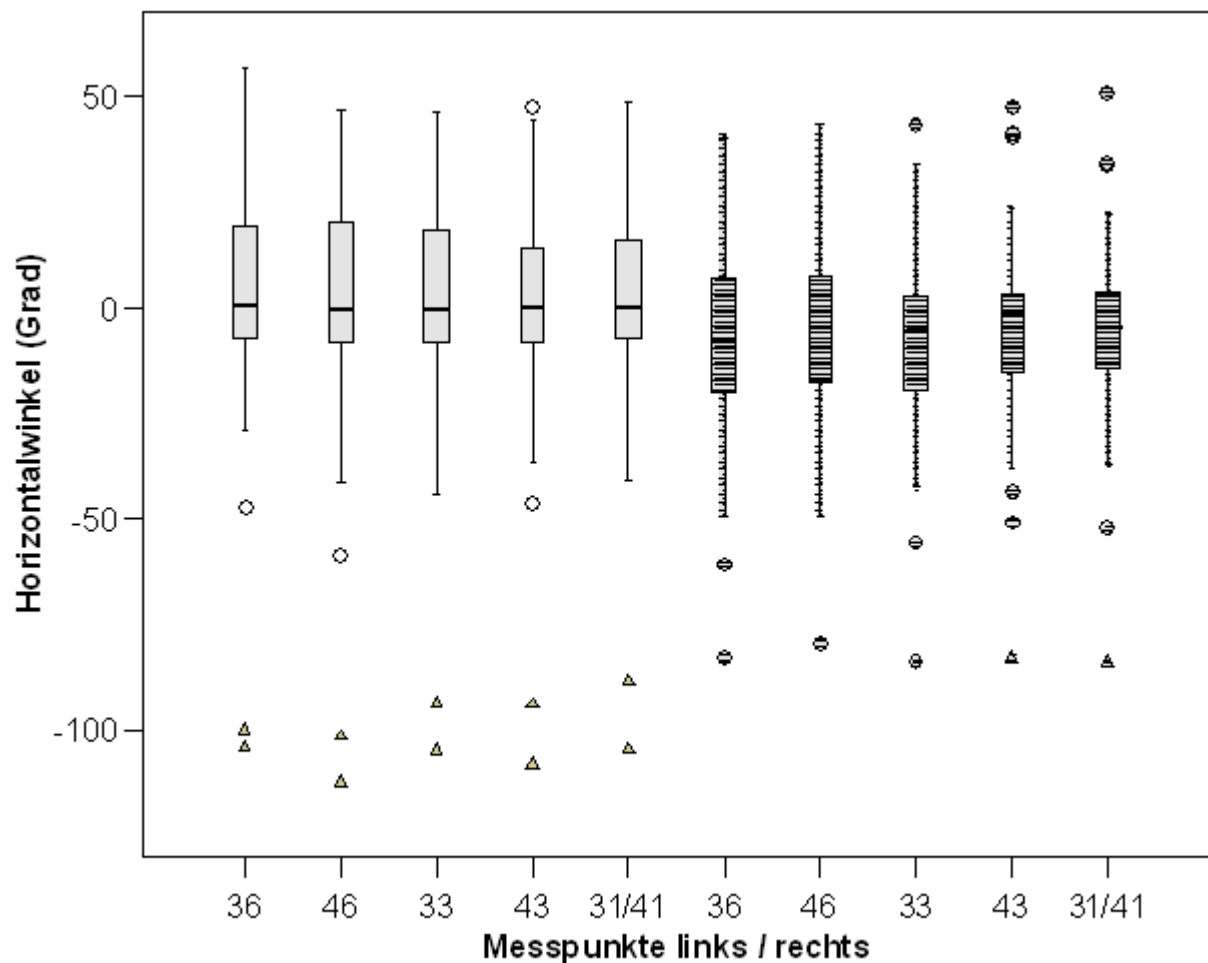


Abb. 12: Boxplot-Darstellung der Winkel-Differenzen des freien Kauens und der Laterotrusion in der Projektion der Horizontalebene

- ▒ rechte Seite
- O Ausreißer
- Δ extreme Ausreißer

Für die initialen Tangentenwinkel in der Horizontalebene konnten keine deutlichen Unterschiede zwischen freiem Kauen und Linkslaterotrusion, dargestellt durch uni-graue Boxen in Abb. 12, festgestellt werden. Für die Rechtslaterotrusion, gekennzeichnet durch gepunktete Boxen in Abb. 12, gilt im Wesentlichen das gleiche. Die Differenzen-Boxplots liegen hier auch im Bereich um Null. Jedoch zeigte sich für die rechte Seite eine Tendenz zur Signifikanz, was die von Null leicht verschiedenen Boxplot-Mediane in diesem Bereich andeuten.

4.5 Zusammenfassung der Messergebnisse

Zusammenfassend sind folgende Aussagen aus den vorliegenden Ergebnissen festzuhalten:

Für den Sagittalwinkel ließen sich hochsignifikante Differenzen ($\alpha < 0,001$) zwischen den Winkeln rein zahngeführter Bewegungen und den Winkeln beim freien Kauen feststellen.

In der Frontalebene ergaben sich für die Winkel der linken Bewegungsrichtung deutliche Unterschiede zwischen rein zahngeführten und Kau-Bewegungen ($\alpha \leq 0,01$), für die Winkel der rechten Bewegungsrichtung lagen die Werte jedoch, außer bei Messpunkt 46 ($\alpha = 0,046$), nicht im Signifikanz-Niveau ($\alpha \geq 0,143$).

Nicht signifikant waren auch die Differenzen in der Horizontalebene auf linker und rechter Seite. Hier ließ sich jedoch eine Tendenz zur Unterscheidung zwischen Kau- und Laterotrusionswinkeln für die Bewegungsrichtung zur rechten Seite feststellen ($0,06 \leq \alpha \leq 0,197$).

5 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurden initiale Tangentenwinkel exkursiver Bewegungsanteile zahngeführter Grenzbewegungen mit denen des freien Kauens in drei verschiedenen Ebenen gemessen und miteinander verglichen. Für die Untersuchungen wurde das Jaw Motion Analysis System der Firma Zebris eingesetzt. Bei jedem der insgesamt 39 Probanden wurde das Öffnen und Schließen des Kiefers, rein zahngeführte Vor- und Seitschubbewegungen, sagittale und frontale Grenzbewegungen und freies Kauen mit Weingummi aufgezeichnet.

Nach Einartikulierung der Modelle mittels Gesichtsbogen wurden für jeden Probanden fünf Messpunkte des Unterkiefers mit der Digitizer-Funktion des JMA in den jeweiligen Bewegungsbahn-Datensatz projiziert: die zentralen Gruben der ersten Molaren, die Kuspidalpunkte der Eckzähne und der Unterkiefer-Inzisivenpunkt. Anschließend wurden in der Sagittal-, der Frontal- und in der Horizontalebene bei jedem Messpunkt für jeden Probanden die initialen Tangentenwinkel der exkursiven Bewegungsanteile beim freien Kauen und bei der entsprechenden zahngeführten Bewegung, d.h. in der Sagittalebene die Protrusion, in der Frontal-/Horizontalebene die Laterotrusion, gemessen und in Tabellen zusammengestellt. Nach Überprüfung des Datenaufnahmeverfahrens wurde in jeder Ebene und für jeden Messpunkt der Wilcoxon-Rangtest auf alle Probanden-Daten zum Vergleich der beiden Bewegungsarten angewendet.

In der Sagittalebene führte die Analyse zu klaren, hochsignifikanten Unterschieden zwischen zahngeführter Protrusion und exkursivem Bewegungsanteil des freien Kauens. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass in der initialen Öffnungsphase des Kauvorganges die Frontzahnführung nicht genutzt wird bzw. eine untergeordnete Rolle spielt.

5.1 Studien über die Bedeutung der Okklusionsebenenneigung und die okklusale Führung bei Kaubewegungsabläufen und Vergleich mit der vorliegenden Arbeit

Ogawa und Mitarbeiter untersuchten 1997 den Zusammenhang zwischen Kaubewegungen und der Okklusions(Kau-)ebenenneigung in der Sagittalen an 41 jungen Erwachsenen. Dabei ergab sich, dass die Okklusionsebene und die Schließbahn der Kaubewegung ein fast senkrechtes Verhältnis zueinander aufrechterhielten, ungeachtet der Unterschiede in der Neigung der Kauebene (Ogawa et al. 1997). Diese Erkenntnis kann mit der Beobachtung erklärt werden, dass der zeitliche Ablauf der Verschiebung des Balance-Kondylus während des Schließens mit der Okklusionsebenenneigung korreliert. Jene beeinflusst ebenso das Kau-Schließ-Muster in der Sagittalen. Es dominierten nach anterior konvexe Schließmuster, wenn sich die Kauebene nach anterior neigte. Im Gegensatz dazu wurde die überwiegende Mehrheit der nach posterior konvexen Kau-Schließ-Muster durch eine nach posterior geneigte Okklusionsebene hervorgerufen. Ogawa vermutete, dass das Sichtbarwerden dieser Grundformen ein harmonisches Verhältnis zwischen der Kauebenenneigung, der Zahnführung und anderen zentralen und peripheren Steuerelementen widerspiegelt. Er schloss daraus, dass der Zusammenhang zwischen der Kauebenenneigung und der Schließbewegung beim Kauen der funktionelle Hintergrund für die Bedeutung der Okklusionsebene sein könnte.

In einer weiteren Studie verglich Ogawa den Neigungswinkel der Okklusionsebene mit der okklusalen Führung als einem entscheidenden Faktor der Kaubewegung (Ogawa et al. 1998). Mittels eines dreidimensionalen Unterkiefer-Bewegungs-Analyse-Systems wurden von Ogawa et al. Kaubewegungen von 41 jungen Erwachsenen gemessen. Der Neigungswinkel der Okklusionsebene wurde mit einem 3-D-Digitizer in der Sagittalebene ermittelt. Der Einfluss der okklusalen Führung und der Okklusionsebenenneigung auf den Verlauf der

Kaubewegungsbahn beim Schließen wurde in verschiedenen Schließniveaus ausgewertet. Daraus ergab sich, dass die Kaubewegungsbahn beim Schließen außerhalb des Interkuspitationsbereiches hauptsächlich durch die Neigung der Okklusionsebene beeinflusst wurde. Nahe des Interkuspitationsbereiches wurde sie ausschließlich durch die okklusale Führung beeinflusst. Das sogenannte „gleitende Kaumuster“ wurde überwiegend an Probanden mit nach posterior geneigter Okklusionsebene beobachtet. Im Gegensatz dazu wurde ein vorherrschend „hackendes Kaumuster“ bei Probanden mit einer nach anterior geneigten Okklusionsebene festgestellt. Als Schlussfolgerung konnten Ogawa und Mitarbeiter festhalten, dass während der Schließphase der Einfluss der Okklusionsebenenneigung auf die Kaubewegung außerhalb des Interkuspitationsbereiches größer ist als der Einfluss der okklusalen Führung.

Von diesen Untersuchungsergebnissen unberührt bleibt bei Ogawa allerdings die initiale Öffnungsphase nahe des Interkuspitationsbereiches, welche in der vorliegenden Arbeit analysiert wurde. Hier hat offensichtlich die okklusale Frontzahn-Führung wenig Einfluss auf die exkursive Bewegungsbahn des freien Kauens, da es zwischen beiden gemessenen Größen in dieser Ebene über alle Messpunkte und alle Probanden hochsignifikante Unterschiede gibt. Die folgende Studie über Kaubewegungsabläufe des Unterkiefers verdeutlicht den geringen Einfluss der Frontzahnführung auf die exkursive Bewegungsbahn.

Goodson untersuchte 1975 die gleichen fünf Bewegungsarten wie in vorliegender Arbeit: Kauen, Öffnen/Schließen, Rechts-Laterotrusion, Links-Laterotrusion und Protrusion. Die parametrisch-elektrischen Outputs eines „Six-Transducer Mandibulograph“ wurden von Goodson genutzt, um dreidimensionale Bahnen, Verlagerungsformen und Geschwindigkeitsprofile ausgewählter Unterkieferbereiche während der Kieferbewegung zu analysieren. Dies erfolgte mit Hilfe von Computer-Anwendungen aus abgeleiteten mathematischen Bewegungsgleichungen. Die Ergebnisse der Untersuchungen von Goodson machten den analytischen und

diagnostischen Wert dieser Methode deutlich und lieferten Einsicht in die Eigenschaften von Unterkieferbewegungen.

Die folgenden Beobachtungen von Goodson fassen die wichtigsten Analyse-Ergebnisse der Kieferbewegungsmuster eines „normalen“ Patienten zusammen:

- Die Kaubewegung wies eine gleichmäßige Ereignis-Sequenz auf.
- Die laterale Kieferbewegung schien in der mastikatorischen Phase und während des Bewegungszyklus vorzuherrschen.
- Der Kauvorgang wurde augenblicklich durch eine vertikale Abwärtsbewegung des Unterkiefers im Freeway-Space unterbrochen, bis die Kondylen ihre Vorwärts-Bewegung mit einer Rotation in der Sagittalen begannen.
- Der okklusale Bereich führte die Abwärtsbewegung entlang einer fast vertikalen Bahn fort, wobei eine Art komprimiertes “8”-Muster in der Frontalebene produziert wurde.
- Die “Öffnungs-/Schließ-“Bewegung zeigte geringe Unschlüssigkeits- bzw. Zöger-Abschnitte.
- Die Kieferbewegung wurde durch eine Vorwärts- und Abwärtsbewegung der Kondylen zusammen mit einer Abwärts- und Rückwärtsbewegung des okklusalen Bereichs initiiert. Diese Bewegung verursachte eine Rotation in der Sagittalebene um eine Bewegungsachse, welche nicht mit der Interkondylarachse übereinstimmt.
- Die allgemeingültige Aussage der “Öffnen-/Schließ-“Bewegung war die der nicht-zufälligen Kurvenbahnen in der Sagittalebene mit geringem lateralem Schwenkbereich.
- Kieferschluss trat mit einer protrudierten Position des Kondylus auf (Goodson und Johansen 1975).

Die Aussage, dass die "Öffnungs-/Schließ-"Bewegung unter anderem durch eine Abwärts- und Rückwärtsbewegung des okklusalen Bereichs initiiert wird, unterstützt die Beobachtung der vorliegenden Arbeit, dass bei Normbiss die Frontzahnführung offensichtlich nicht auffallend relevant für die initiale *exkursive* Bewegung beim freien Kauvorgang ist.

Jedoch traten bei den Messungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit für Rechts- und Linkslaterotrusion in der Horizontalebene und für Rechtslaterotrusion in der Frontalebene statistische Übereinstimmungen von Kaubewegungen und zahngeführten Grenzbewegungen auf.

5.2 Studien zum Okklusionsphasenbereich, der Zusammenhang zur Kauseitenpräferenz und Vergleich mit der vorliegenden Arbeit

Hayasaki suchte 1999 nach einer Methode zur Berechnung des Okklusionsphasen-Bereiches bei Kaubewegungen. Dieser Bereich wurde in seiner Studie als zurückgelegte Distanz des unteren Inzisiven-Punktes bei Kaubewegung mit gleichzeitigem Zahnkontakt definiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Bereich der Okklusionsphase mittels computergestützter, opto-elektronischer Aufzeichnung und ohne die morphologischen Daten eines Gipsmodells berechnet werden kann. Sie ließen darauf schließen, dass Zahnkontakte während Kaubewegungen auftreten (Hayasaki et al. 1999).

Auch aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit können entsprechende Schlussfolgerungen für die Frontalebene gezogen werden. Dabei waren keine signifikanten Unterschiede zwischen freiem Kauen und zahngeführter Bewegungsbahn bei initialer Rechts-Laterotrusion zu erkennen. Bei entsprechenden Bewegungen zur linken Seite konnte jedoch ein signifikanter Unterschied der initialen Bahnwinkel festgestellt werden. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass das

okklusale Höckerrelief auf die rechts-laterotrusive Bewegung beim Kauvorgang einen mit Abstand größeren Einfluss hat als auf die links-laterotrusive Bewegung.

An dieser Stelle lässt sich eine Verbindung zur sogenannten "Kauseitenpräferenz" ziehen, zu der Varela eine Untersuchung durchführte (Varela et al. 2003). Für viele menschliche Aktivitäten existiert eine "Seitenpräferenz", d.h. eine Tendenz, die eine oder andere Seite des Körpers vorzugsweise zu benutzen. In Bezug auf die Hände z.B. hat eine überwältigende Mehrheit der Individuen eine Präferenz für die rechte oder linke Hand. Die meisten Experten sind sich darin einig, dass der Kauvorgang keine Ausnahme bildet und es somit eine "präferierte Kau-Seite" gibt, jedoch ist die Vermessung oder Bestimmung einer solchen Präferenz komplex. Varela et al. analysierten den Kauvorgang von 60 gesunden Probanden mittels "Preferred-Chewing-Side"(PCS)-Tests, dem sog. Kazazoglu-Test, und Kinesiographie. Während einige Autoren die PCS für diejenige Seite halten, die als erste in Kontakt mit der Nahrung kommt, zog Varela es vor, die PCS als die Seite zu definieren, auf welcher die Mehrheit der Kauzyklen aufgezeichnet und analysiert wurden. Das Ziel dieser Untersuchungen war, den möglichen Zusammenhang zwischen den beiden Methoden zur Bestimmung der Kauseitenpräferenz zu analysieren. Obwohl keine statistisch signifikante Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der beiden Verfahren herrscht, deuten beide darauf hin, dass es beim Kauen eine besondere Vorliebe für die rechte Seite geben muss (Varela et al. 2003).

Dies mag auch der Grund dafür sein, dass sich in der vorliegenden Arbeit eine gewisse Übereinstimmung der beiden Bewegungsarten „Kauen“ und „zahngeführte Bewegung“ in der initialen exkursiven Bahn vor allem auf der rechten Seite zeigte.

In einer jüngeren Studie, die an einer bevölkerungsrepräsentativen Studienpopulation von 4086 Probanden durchgeführt wurde, wurde ebenfalls das Vorhandensein einer bevorzugten Kauseite untersucht (Diernberger et al. 2008). Entsprechend der positiven oder negativen Selbstausskunft der Probanden über eine

Kauseitenpräferenz wurden zwei Gruppen gebildet. Nach Anpassungstests und multiplen Regressionsanalysen über die Bedeutung des Zusammenhangs zwischen einer PCS und kranio-mandibulären Dysfunktionen oder dentalen Faktoren ergab sich eine Prävalenz einer PCS von 45,4%. Bei Frauen zwischen 40 und 69 Jahren lag dieser Anteil sehr viel höher. In dieser Gruppe war die Präferenz für die rechte Seite mit 64% angegeben. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Angaben über eine Kauseitenpräferenz mit einseitigen Anzeichen einer kranio-mandibulären Dysfunktion assoziiert waren. Zumeist lagen in jenen Fällen Kiefergelenksschmerzen oder asymmetrischer Verlust von Zähnen vor (Diernberger et al. 2008).

In der Studie von Diernberger et al. wurden in Bezug auf eine präferierte Kauseite lediglich die eigenen Angaben der Probanden berücksichtigt. Untersucht wurden demgegenüber Funktionsparameter und dentale Faktoren. In der vorliegenden Arbeit wurden die Messungen nur an Probanden durchgeführt, die subjektiv keine Kiefergelenksbeschwerden hatten. Aus den Ergebnissen der Studie von Diernberger et al. könnte man den Umkehrschluss ziehen, dass ein positives Ergebnis eines PCS-Tests gleichzeitig ein Indiz für das Vorliegen einer kranio-mandibulären Dysfunktion ist. In Bezug auf die Probandengruppe der vorliegenden Arbeit lässt sich nicht mit letzter Sicherheit sagen, ob nicht bei einigen Probanden zumindest eine latente kranio-mandibuläre Dysfunktion vorlag, da sich in dem Fall die entsprechenden Daten nur auf subjektive Angaben stützten. Um den Zusammenhang zwischen einer Kauseitenpräferenz und kranio-mandibulären Dysfunktionen abschließend beurteilen zu können, muss man die Ergebnisse weiterer Studien abwarten.

5.3 Studien von Mizuno über den Zusammenhang zwischen Kauen und zahngeführter Lateralbewegung und Vergleich mit der vorliegenden Arbeit

Untersuchungen mit ähnlicher Problemstellung führte bereits Mizuno durch (Mizuno 1989b). Die Zielsetzung seiner ersten Studie aus dem Jahre 1989 war, das Verhältnis zwischen Gleitbewegungen während des Kauens und Lateralbewegungen ausgehend vom Schlussbiss zu klären. Zu diesem Zweck wurden zwei verschiedene Arten dreidimensionaler Unterkieferbewegungen gemessen, und zwar laterale Auslenkungen und kauähnliche Leermastikation an 10 Probanden. Die Bewegungsbahnen wurden in der lateralen Okklusionsposition miteinander verglichen. In dieser Position ist der Inzisalpunkt 2,0 mm von der Interkuspidationsposition entfernt. Die Ergebnisse von Mizuno konnten wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Positionen des Molaren auf der Arbeits- und auf der Balanceseite lagen während des Kauvorganges tendenziell inferior der Positionen bei Lateralbewegung.
- Der zurückgelegte Weg des Arbeitsseiten-Kondylus war während des Kauens signifikant kürzer als während der Lateralbewegung.
- Die Position des Balanceseiten-Kondylus war während des Kauens tendenziell medialer als während lateraler Auslenkung.
- Die Abweichungen in der Kondylus-Position waren in hohem Maß vom Differenz-Betrag in der Molaren-Position abhängig.

Die o.g. Unterschiede wurden von Mizuno auf die Unterschiede in der Kaumuskul-Aktivität und in den Okklusalkontakten zurückgeführt (Mizuno 1989b). Werden die Ergebnisse Mizunos in Bezug zur vorliegenden Arbeit gesetzt, so ist lediglich die erste der oben genannten vier Aussagen von Bedeutung. Sie bestätigt das Ergebnis, dass bei Lateralbewegung tendenziell kein Zusammenhang zwischen zahngeführter Grenz- und Kaubewegung vorliegt. Jedoch wurden in der vorliegenden Arbeit die Lateralbewegungen seitenweise getrennt voneinander betrachtet, und nicht als eine statistische Einheit, wie bei Mizuno. In seiner Studie

wurde lediglich zwischen Arbeits- und Balanceseite unterschieden und nicht die Richtungen der Bewegung.

Eine weitere von Mizuno durchgeführte Studie aus dem Jahr 1989 sollte das Verhältnis zwischen der Kaufläche eines Molaren und Unterkieferbewegungen klären. Für diesen Zweck wurden die Kaufläche des oberen ersten Molaren und die dreidimensionale Bewegung des unteren ersten Molaren während der Gleitbewegungen beim Kauen, ähnlich der Leermastikation, in Relation gesetzt. Die folgenden drei Parameter wurden analysiert:

- 1) die Distanz zwischen oberem und unterem ersten Molaren in der lateralen Okklusionsposition,
- 2) die Neigung des Höckerabhangs,
- 3) die Bahnneigung des unteren ersten Molaren.

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Auf der Arbeitsseite hängt die Neigung des Höckerabhangs eng mit der Bahnneigung zusammen.
- Auf der Balanceseite war der Zusammenhang zwischen der Höcker- und der Bahnneigung so schwach, dass man die Differenz als statistisch signifikant bezeichnen kann.
- Die Distanz zwischen den Molaren vergrößerte sich mit zunehmender Steilheit der Bewegungsbahn. Diese Tendenz war auf der Balanceseite zu beobachten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Mizuno belegen, dass bei steilerer anteriorer Führung oberer und unterer erster Molar beidseits stärker diskluieren, wohingegen auf der Arbeitsseite ein steilerer Höckerabhang die Molaren an einer exzessiveren Disklusion hindert (Mizuno 1989a).

5.4 Geschlechtsunterschiede in der Kauzyklus-Kinematik und deren Bedeutung für die Messungen der vorliegenden Arbeit

Im Jahre 2005 war die Zielsetzung einer Studie von Salsench, die Dauer der einzelnen Phasen eines Kauzyklus und die Höhe eines Kauzyklus in Relation zum Laterotrusionsführungstyp zu bewerten. Dazu wurden 53 Probanden mit demselben Laterotrusionsführungstyp auf beiden Seiten in drei Gruppen eingeteilt: Frontführung, Eckzahnführung und Gruppenführung. Der Overbite wurde klinisch gemessen. Grenzbewegungen wurden mittels eines Sirognathographen aufgezeichnet, und der Laterotrusionswinkel wurde in der Frontalebene bestimmt. Außerdem wurden Kieferbewegungen während einseitigen Kauens von Erdnüssen mit einem Sirognathographen aufgezeichnet, der an einen für die Übertragung erforderlichen Elektrokardiographen angeschlossen war. Ein einzelner Kauzyklus wurde unterteilt in Öffnungs-, Schließ- und Okklusionsphasen. Die Kauparameter wurden mittels Varianzanalyse, Korrelationen, gepaartem T-Test und multipler linearer Regression analysiert.

Die Ergebnisse zeigten bei Frauen eine signifikant längere Kauzyklusdauer als bei Männern. Probanden mit Eckzahnführung zeigten den größten Laterotrusionsführungswinkel und die längste Kauzyklusdauer. Probanden mit Frontführung wiesen signifikant längere Okklusionsphasen auf. 59% der Schwankungen der Okklusionsphasendauer konnten mit dem Laterotrusionsführungstyp erklärt werden, waren geschlechtsspezifisch oder hingen vom Laterotrusionsführungswinkel ab. Salsench folgerte daraus, dass der Laterotrusionsführungstyp, das Geschlecht und der frontale Führungswinkel mit der Dauer der Okklusionsphase während einseitigen Kauens von Erdnüssen korrelierten. Die Kauhöhe hing nicht mit dem seitlichen Führungstyp zusammen (Salsench et al. 2005).

In dem Bereich der Kauzyklus-Kinematik entdeckten auch bereits Buschang und Mitarbeiter hochsignifikante Geschlechtsunterschiede (Buschang et al. 2000). Diese spielen jedoch in der vorliegenden Arbeit eine untergeordnete Rolle, da hier die

Führungswinkel im Okklusionsbereich untersucht wurden. Die komplette Bewegungsbahn der Kauzyklen wurde hier nicht berücksichtigt.

5.5 Studien über den Einfluss des Nahrungsbolus auf den Kaubewegungsverlauf und deren Bedeutung für die Messungen der vorliegenden Arbeit

Miyawaki et al. zogen aus den Ergebnissen einer Studie aus dem Jahre 2000 den Schluss, dass Menschen einen harten, zusammenhängenden Nahrungsbolus in der Weise kauen, dass die Unterkieferzähne, welche in Kontakt mit Nahrung kommen, auf eine der Größe des Bolus äquivalente Höhe diskudieren und Änderungen im Bewegungsablauf der jeweiligen restlichen Bereiche des Unterkiefers zur Sicherung eines effizienten Kauens minimiert werden (Miyawaki et al. 2000). Darüber hinaus stellten Amemiya und Mitarbeiter eine enge Beziehung zwischen der okklusalen Lage der Kiefer, des Bewegungsverlaufes des Nahrungsbolus und dessen Beschaffenheit fest (Amemiya et al. 2002). Das Ergebnis stimmt überein mit dem von Sasamoto et al., die bereits an Ratten den starken Einfluss der Geschmacksstimulation auf das Kaubewegungsmuster entdeckten (Sasamoto et al. 2001). Diese Variablen wurden in der vorliegenden Arbeit durch die Vorgabe des Weingummis als Nahrungsbolus und die Beschränkung des Messbereichs auf die initialen Führungswinkel ausgeschlossen bzw. eine Standardisierung durch das gewählte Kaugut vorgenommen.

Auch Pröschel und Hofmann beschäftigten sich 1988 mit Kaumustern des Inzisalpunktes in der Frontalebene und deren Abhängigkeit von der Nahrungsfestigkeit und des Okklusionstyps (Pröschel und Hofmann 1988). Sie forderten für eine umfassende Beurteilung des kompletten Kauverhaltens eines Individuums die Einbeziehung von sowohl harter als auch weicher Nahrung. Als ein Ergebnis ihrer Studie konnte festgehalten werden, dass sich im Allgemeinen bei

Probanden mit Angle-Klasse I und II für harte Nahrung stark abgewinkelte, hackende Mahlbewegungen und für weiche Nahrung eher tropfen- oder linsenförmige Kaumuster ergeben.

Bei Studien, in denen sich für die Probanden die Notwendigkeit einer Nahrungsbolusaufnahme ergibt, stellen sich gleichzeitig auch Probleme der Standardisierung, der Konservierung und der Hygiene. Diese Probleme wurden in der vorliegenden Arbeit durch die Wahl eines einzigen, standardisierten Nahrungsbolus (s. Kapitel 3.2) umgangen, dessen Konservierungs- und Hygienefähigkeit den Verlauf der Studie in keiner Weise beeinträchtigten. Somit blieb die Variabilität der Kaumuster bei variierender Nahrungsbeschaffenheit in der vorliegenden Arbeit ohne Relevanz.

5.6 Studien über intraorale Fremdkörperreize und Vergleich mit deren Relevanz in der vorliegenden Arbeit

Eine Studie von Ekert aus dem Jahre 1988 beschäftigte sich mit der Beeinflussung von Kaumustern durch intraorale Fremdkörperreize (Ekert 1988). Die Untersuchungen wurden mit dem Sirognathographen der Firma Siemens AG, Bensheim, durchgeführt. In Anlehnung an andere bestehende Messmethoden zur Registrierung von Unterkieferbewegungen dienten ein von intra- nach extraoral geführter Kunststoffdraht bzw. ein paraokklusaler Löffel im Oberkiefer als intraoraler Fremdkörperreiz. Der Vergleich der Kaubewegungen unter diesen drei verschiedenen Bedingungen ergab zum Teil deutliche intraindividuelle Abweichungen der Kaubewegungen ohne Fremdkörperreiz im Vergleich zu denen mit intraoralem Fremdkörperreiz. Unter diesem Einfluss schien sich die Veränderung der Kaubewegungen eines Probanden auch auf sein Kaubewegungsmuster bzw. die Summe der Kauzyklen auszuwirken.

Da intraorale Fremdkörperreize eine gewisse Rückwirkung auf das stomatognathe System zeigten, schloss Ekert, dass sie bei der Registrierung von Unterkiefer-Funktionsbewegungen soweit wie möglich vermieden werden sollten (Ekert 1988).

Daraus ergab sich die Hypothese, dass für den Probanden unübliche Gegebenheiten, und somit auch Aufzeichnungsapparaturen, den Kauvorgang abwandeln. Gerstner und Fehrman stellten 1999 fest, dass die Möglichkeit zur Erforschung dieser Hypothese dann gegeben wäre, wenn Kieferbewegungen mit non-invasiven Apparaturen aufgezeichnet werden könnten (Gerstner und Fehrman 1999). Dazu nahmen sie eine quantitative Untersuchung über den Zusammenhang zwischen Kinn- und Kieferbewegungen bei Kaugummi-Kauen vor. Das Ausmaß und der zeitliche Ablauf der Koordinaten-Auslenkung, die Geschwindigkeit und die Beschleunigungs-Extrema wurden für die Daten der Kiefer- und der Kinnbewegung dreidimensional berechnet. Die Ergebnisse zeigten, dass bei Beschleunigungs-Extrema die Koordinaten des Kinns und des Kiefers eher in Zusammenhang gebracht werden konnten als die jeweilige Bewegungsabfolge, d.h., der entsprechende Messpunkt des Kiefers korrelierte zwar mit dem des Kinns, beide wiesen jedoch zur selben Zeit nicht die gleiche Bewegung bzw. Bewegungsrichtung auf. Im Gegensatz dazu war bei Auslenkungs-Extrema die Koordinaten-Korrelation geringer als die zeitliche Korrelation, d.h., beide Messpunkte waren zum entsprechenden Zeitpunkt im gleichen Bewegungsablauf begriffen, konnten jedoch räumlich nicht gut einander zugeordnet werden. Die stärkste Übereinstimmung ergab sich für die Kaufrequenz. Gerstner und Fehrman zogen daraus den Schluss, dass Kinn- und Kieferbewegungen während des Kauvorgangs korrelieren. Dennoch wäre lediglich die Kaufrequenz aus den Daten der Kinnbewegungen berechenbar.

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurden mit dem Jaw Motion Analyzer der Firma Zebris durchgeführt. Dafür war es notwendig, dass bei jedem Probanden vestibulär der Unterkiefer-Frontzähne ein Fixierungsbehelf für den Ultraschall-Sender des Registrierungs-Systems angebracht wurde. Dies stellte einen minimalen

intraoralen Fremdkörperreiz dar, welcher für die vorliegende Arbeit in Kauf genommen werden musste, da der Ultraschall-Sender ein fester und unabdingbarer Bestandteil des Untersuchungsprotokolls war.

5.7 Untersuchungen über Haut-Marker für die optoelektronische Bewegungsaufzeichnung und Vergleich mit dem Mess-Ziel der vorliegenden Arbeit

Im Jahre 1998 bewerteten Häggman-Henrikson und Mitarbeiter die Eignung von haut- und zahnbefestigten Markern bzw. Sendern, welche an Unterkiefer und Kopf für die optoelektronische Aufzeichnung von Kaubewegungen fixiert werden (Häggman-Henrikson et al. 1998). Die Marker wurden hierfür bei sieben Probanden an den oberen und unteren Inzisiven, auf der Stirn, dem Nasenrücken, der Nasenspitze und auf dem Kinn befestigt. Mit einem hochauflösenden System für schnurlose optoelektronische Aufzeichnung wurden nun Kaubewegungen registriert. Bei den Messungen lösten sich die auf der Haut befestigten Marker aufgrund der elastischen Dehnung der Haut ab. Die höchste Ablösungsrate wurde für den Kinn-Marker beobachtet, während am wenigsten Marker-Verluste an der Stirn und am Nasenrücken stattfanden. Die Vermutung liegt nahe, dass der Grund dafür in den verschiedenen Beweglichkeiten der entsprechenden Hautpartien liegt. Trotz einer hohen Verlustrate des Kinn-Markers wurden die zeitlichen Abläufe der Unterkiefer-Bewegungen nicht beeinträchtigt. Über die Ablösungsraten von zahnbefestigten Markern wurden keine näheren Angaben gemacht, jedoch wird man annehmen dürfen, dass diese aufgrund der geringeren Beweglichkeit sehr viel geringer waren als jene für die Haut-Marker. Zahnbefestigte Marker begründeten eine signifikante Vergrößerung der vertikalen Mundöffnung, obwohl sich die Dauer der einzelnen Kauzyklen nicht änderte. Das deutet auf einen Anstieg der Kaugeschwindigkeit hin. Häggman-Henrikson et al. empfahlen aufgrund ihrer Untersuchungsergebnisse Marker auf dem Nasenrücken als akzeptablen Referenzpunkt für die Aufzeichnung von Kaubewegungen und Kinn-Marker als

verlässlich für zeitliche Analysen. Auf den Zähnen befestigte Marker beeinflussen möglicherweise das natürliche Kauverhalten (siehe auch (Ekert 1988)). Aus ihren Ergebnissen schlossen Häggman-Henrikson et al., dass beide Markersystem-Typen sowohl Vor- als auch Nachteile im Hinblick auf die Genauigkeit der Kaubewegungs-Analyse haben. Die Wahl des Markersystems solle auf die Ziele der jeweiligen Studie ausgerichtet sein.

In der vorliegenden Arbeit ging es um die Analyse von Bewegungsbahnwinkeln im Okklusalbereich in der initialen exkursiven Phase. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, für die Bewegungsaufzeichnungen Marker oder einen Bissbehelf direkt an den Zähnen zu befestigen. Die Wahl der Messmethode fiel daher in der vorliegenden Arbeit auf ein Ultraschall-Laufzeitmesssystem mit individualisiertem, intraoral zahnbefestigtem Behelf für den Bewegungs-Sender. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, bestand anschließend über die einartikulierten Modelle die Möglichkeit, weitere virtuelle Markerpunkte in der Software hinzuzufügen und sich deren Bewegungsbahn anzeigen zu lassen.

5.8 Untersuchungen von Pröschel zur individuellen Registrierung von Unterkiefer-Bewegungen und Vergleich mit dem Messsystem der vorliegenden Arbeit

Pröschel und Mitarbeiter arbeiteten 2002 an der Entwicklung eines einfach anzuwendenden Verfahrens für die individuelle Registrierung von Unterkiefer-Bewegungen und testeten dessen Präzision (Pröschel et al. 2002). Anders als bis dahin üblich sollte die Methode auf einem Transfer der Artikulator-Geometrie auf den Patienten basieren. Das Messgerät bestand aus einem Artikulator mit einer Bissgabel in Standardposition, welches in Verbindung mit

einem elektronischen Messsystem stand. Dieses ermöglichte virtuell den Transfer der Artikulator-Kondylenpunkte zum Probanden-Unterkiefer mittels eines Zentrik-Registrats. Die Bewegungsbahnen dieser Punkte wurden dann während Pro- und Laterotrusion aufgezeichnet. Sie dienten als Grundlage für die Messung des sagittalen Kondylenbahnwinkels und des Bennett-Winkels. Diese wurden im Artikulator eingestellt, nachdem die Probanden-Modelle mittels Bissplatte einartikuliert worden waren. Mit einem mechanischen Prüfgerät wurde nun die Präzision der gemessenen Winkel untersucht, indem diese Werte mit voreingestellten Werten von 10 bis 60 Grad für den Kondylenbahnwinkel und von 0 bis 40 Grad für den Bennett-Winkel (in 10-Grad-Schritten) verglichen wurden. Die mittleren Abweichungen betrugen beim Kondylenbahnwinkel zwischen 1,5 und 0 Grad und beim Bennett-Winkel zwischen -0,5 und -1,3 Grad.

Pröschel et al. folgerten aus den Ergebnissen dieser Studie, dass durch den Transfer der Artikulator-Geometrie auf den Patienten die Zahl der individuellen Parameter, welche für den Kondylenbahn- und den Bennett-Winkel zur Simulation der Unterkiefer-Bewegungen notwendig sind, erheblich reduziert wird. Dies führe nach Pröschel zu einer signifikanten Vereinfachung der Registrierung und des Modelltransfers. Solange die benötigten Parameter nicht mit hoher Präzision direkt gemessen werden können, ist nach Pröschel et al. diese Methode eine gute Alternative zur herkömmlichen, komplizierten instrumentellen Registrierung.

Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Jaw Motion Analyzer wurde einige Jahre vor dem 2002 von Pröschel und Mitarbeitern entwickelten Registrierungsprinzips entworfen. Bei dem JMA-System müssen bei angelegter Apparatur individuell auf der Haut markierte Kondylenpunkte am Probanden abgegriffen und rechnerisch dreidimensional gespeichert werden. Optional können von Modellen, welche per arbiträrem Gesichtsbogen einartikuliert wurden, weitere Punkte der Zahnreihe in das Programm übertragen und deren Bewegungsbahnen angezeigt werden, wie in der vorliegenden Arbeit geschehen.

5.9 Untersuchungen zum Zusammenhang der Zahnführung mit der Kaubewegung über die Zahnführungsrate und Vergleich mit der Vorgehensweise in der vorliegenden Arbeit

Eine Studie von Ferrario und Mitarbeitern beschäftigte sich 2001 mit der dreidimensionalen Zahnführung exkursiver Laterotrusion und dem Zusammenhang

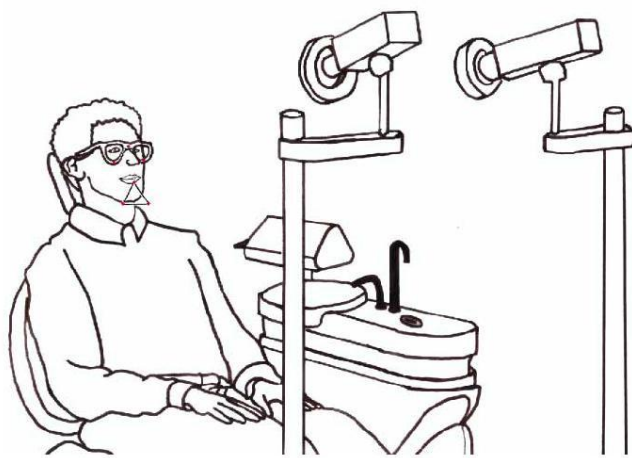


Abb. 13: Aufbau der

mit der Kieferbewegung bei einseitigem Kauen (Ferrario et al. 2001). Die dreidimensionalen Unterkiefer-Bewegungsbahnen in seitlichen Führungsbewegungen und im terminalen Teil eines einseitigen Kauhubs wurden mittels einer elektronischen Infrarot-Bewegungs-Analyse-Einheit an einer Gruppe junger Erwachsener mit kompletter,

bleibender Dentition gesammelt. Abb. 13 zeigt den Aufbau der Bewegungs-Analyse-Einheit bei Ferrario et al. mit den zwei Infrarot-Kameras. Bei ausgesuchten Datensätzen wurde jeweils eine Linie, welche einen 2,5 mm von der maximalen Interkuspidationsposition entfernten Punkt berührte, dazu benutzt, um die Eckzahn- und Molaren-Führungsanteile zu berechnen. Aus den aufgezeichneten Bewegungen wurden die weitesten und umfangreichsten Bahnen, die sich am nächsten an den physischen Grenzen der Zahnführung bei einseitigem Kauen und Laterotrusion befanden, gewählt.

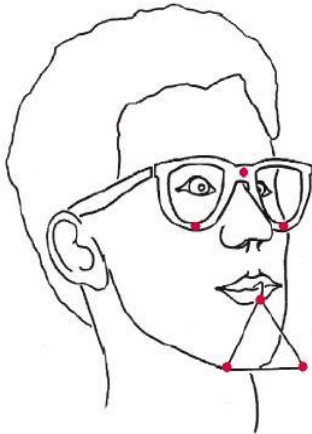


Abb. 14: Positionen der
extraoralen Marker

Für diese Studie wurden 22 Probanden zwischen 20 und 33 Jahren (mittleres Alter 22,7 J.) ausgewählt. Alle hatten gesunde, komplette und permanente Dentitionen sowie Angle-Klasse-I-Okklusion. Overbite und Overjet lagen zwischen 2 und 4 mm. Ferner lagen weder Gussrestaurationen noch kranio-mandibuläre Dysfunktionen oder Okklusionsstörungen vor. Probanden mit kraniofazialem Trauma oder kongenitalen Anomalien wurden nicht in die Auswahl aufgenommen.

Es wurden nun dreidimensionale Koordinaten von drei kranialen Punkten, fünf intraoralen mandibulären Zahnpunkten und drei extraoral auf einer Unterkiefer-Antenne lokalisierten Punkten erhoben. Dazu wurde an jedem extraoralen Punkt ein halbkugelförmiger reflektierender Marker befestigt. Zwei hochauflösende infrarot-sensitive CCD-Videokameras in Verbindung mit einem 50-Hz-Videoprozessor lieferten die 3D-Koordinaten des Schwerpunktes aller Markierungen während der Unterkieferbewegungen.

Drei Marker wurden auf einem Brillengestell platziert (für Nasion sowie linker und rechter Infraorbitalpunkt) und bildeten somit eine kraniale Referenzebene, wie Abb. 14 verdeutlicht. Die fünf mandibulären Marker wurden an folgenden intraoralen Markpunkten befestigt: die Mittelpunkte der mesialen



Randleisten der ersten Molaren, die labialen Seiten der Eckzahn-Kauspitzen und der Interinzisalpunkt (siehe Abb. 15). Diese Marker stellten die Okklusalebene und ihre relative Position zur kranialen Referenzebene dar. Für die Messungen der Unterkieferbewegungen saß der Proband in einer aufrechten Position. Es wurden statische (offene und geschlossene Kieferposition) und dynamische Aufzeichnungen vorgenommen (rechts-/linkslateral geführte Bewegungen, Kaugummi-Kauen auf rechter und linker Seite, jeweils fünf Kauzyklen). Danach wurden rechnerisch die Kopf- und Nackenbewegungen von den aufgezeichneten Daten subtrahiert, um die reinen Unterkieferbewegungen zu erhalten. Die Orientierung des Kopfes im Raum und die relative Distanz der fünf intraoralen Marker zur extraoralen Antenne wurde berechnet. Danach konnten die einzelnen Unterkieferbewegungen mit Hilfe der fünf intraoralen Marker und deren relativer Bewegung zur kranialen Referenzebene rekonstruiert werden. Um die Unterkieferbewegungen verschiedener Probanden miteinander vergleichen zu können, wurde eine normalisierte Referenzebene errechnet, indem jede dreidimensionale Aufzeichnung in der Weise gedreht wurde, dass danach die Okklusalebene genau horizontal lag.

Abb. 15: Positionen der

Die von jedem Probanden gesammelten Koordinaten der fünf dentalen Marker wurden nun für die Berechnung der Tangentenneigung an Bahnpunkten verwendet, welche 2,5 mm von der Interkuspidationsposition entfernt lagen. Zunächst wurden die Werte bei der initialen Phase der Rechts- und Links-Laterotrusion abgegriffen, dann im terminalen Teil eines typischen Kauzyklus. Diese Winkelmessung wurde in der Sagittal-, Frontal- und Horizontalebene durchgeführt.

Aus den gemessenen Werten wurde die Zahnführungsrate ("Dental Guidance Ratio" = DGR) ermittelt. Sie ist ein Prozentwert und drückt die Relation des Kaubewegungswinkels zum

lateralen Führungswinkel im gemessenen Punkt aus. Je kleiner der Wert ist, desto stärker werden die Kaubewegungen von der Zahnführung begrenzt bzw. desto definierter lagen bei Ferrario et al. die Kaubewegungsbahnen innerhalb der jeweiligen zahngeführten Grenzbewegung.

Abb. 16 verdeutlicht diese Gegebenheit am Beispiel der Frontalebene. Die DGR wurde separat für Eckzähne und Molaren berechnet. Der Wert für die

Arbeitsseite ergab sich durch den Vergleich der terminalen Phase einseitigen Kauens mit der initialen Phase ipsilateraler Zahnführung, während der Wert für die Nicht-Arbeitsseite aus dem Vergleich der terminalen Phase einseitigen Kauens mit der initialen Phase kontralateraler Arbeitsseiten-Zahnführung gewonnen wurde. Daraufhin wurden deskriptive Statistiken errechnet.

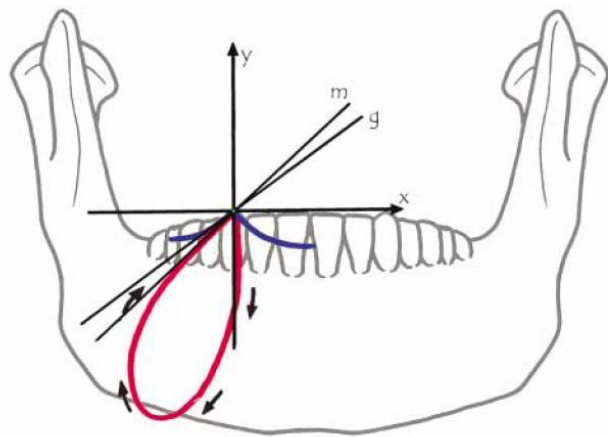


Abb. 16: Zahngeführte Laterotrusion (blau) und ein Kauzyklus (rot) in der Frontalebene; die Tangente „m“ (=mastication) liegt innerhalb der Tangente „g“ (=guidance), die Kaubewegung wird von der Zahnführung aus: Ferrario et al. 2001



Unter der Annahme, dass Kaubewegungen eines jeden Probanden durch die Zahnanatomie begrenzt oder geführt werden, würden bei der Studie von Ferrario et al. DGR-Werte von unter 100% erwartet. Dies traf lediglich für die Frontalebene mit einem Durchschnittswert von 80% auf der Arbeitsseite bei Eckzähnen und Molaren zu. Die tiefsten Werte von ca. 60% wurden in dieser Ebene auf der Nicht-Arbeitsseite bei Molaren und Eckzähnen gemessen.

In der Sagittal- und Horizontalebene lagen die DGR-Durchschnittswerte stets über 100%. Die niedrigsten Variations-Koeffizienten ließen sich in der Frontalebene finden, mit wiederum niedrigeren Werten auf der Arbeitsseite. Ebenfalls auf der Arbeitsseite wurden in der Frontalebene höhere Variations-Koeffizienten für Eckzähne als für Molaren errechnet. Demgegenüber wurden in der Sagittalebene höhere Molaren-Variations-Koeffizienten beobachtet.

Ferrario folgerte aus seinen Messergebnissen, dass innerhalb seiner Studie Kaubewegungen im Rahmen der physischen Grenzen lediglich in der Frontalebene durch die Zahnanatomie beeinflusst wurden, jedoch nicht in der Sagittal- oder Horizontalebene. Die Variationswerte auf der Nicht-Arbeitsseite unterschieden sich in den verschiedenen Ebenen nicht wesentlich, wohingegen auf der Arbeitsseite starke Unterschiede der Ebenen in der Variation auffielen. Dort wurden die geringsten Werte, d.h. die stärkste Abhängigkeit in der Frontalebene für Eckzähne und Molaren und in der Sagittalebene bei den Eckzähnen gemessen (Ferrario et al. 2001).

Die Erkenntnisse von Ferrario stimmen mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit insofern überein, dass sich hier in der Horizontalebene statistisch keine wesentlichen Signifikanzen bzw. Unterschiede in den initialen Winkeln der einzelnen exkursiven Bewegungsbahnen, Kauen vs. zahngeführte Laterotrusion, fanden. Jedoch wurden in der Studie von Ferrario et al. Tangentenwinkel an exkursiven Bewegungsbahnen bei Laterotrusion mit Tangentenwinkeln an inkursiven Bewegungsbahnen in der terminalen Phase eines Kauzyklus verglichen, welche am jeweiligen

Berührungspunkt 2,5 mm Abstand aufwiesen. Demgegenüber wurde in der vorliegenden Arbeit der Berührungspunkt der Tangente bei jeder Messung im Nahbereich des Ausgangspunktes der Bewegung festgelegt. Überdies wurden ausschließlich Tangentenwinkel an *exkursiven* Bewegungsbahnen verglichen, sowohl bei Zahnführung als auch bei Kaubewegung.

5.10 Studien zur Kaufrequenz und deren Gewichtung in der vorliegenden Arbeit

Woda und Mitarbeiter konstatierten in einem Übersichtsbeitrag, dass der Kauvorgang ein vom zentralen Nervensystem kontrollierter physiologischer Prozess ist, der durch verschiedene Einflüsse von Mund und Zähnen modifiziert bzw. moduliert wird (Woda et al. 2006a). Sowohl die intrinsischen Gegebenheiten des Individuums als auch die extrinsischen Charakteristiken des gekauten Nahrungsbolus sind verantwortlich für die Variation in der Kaufunktion. Alter, Geschlecht und Zahnstatus stellen die meist untersuchten intrinsischen Faktoren dar, während Nahrungshärte, rheologische Eigenschaften wie Plastizität oder Elastizität und Bolusgröße die bekannteren extrinsischen Einflüsse seien. Diese Faktoren lösen eine physiologische Adaption aus, die bei einzelnen Kauzyklen oder über die gesamte Kausequenz auftreten kann.

Üblicherweise werden elektromyographische und kinematische bzw. Kieferbewegungsaufzeichnungen verwendet, um Kauvorgänge zu untersuchen, aufgrund derer verschiedene Variablen gemessen werden können. Vertikale und laterale Amplituden und Kieferbewegungsgeschwindigkeiten können nur über kinematische Aufzeichnungen gewonnen werden. Bioelektrische Aktivitäten eines Kauzyklus oder einer Kausequenz sind eng an Kaukräfte gekoppelt und können aus elektromyographischen Aufzeichnungen ermittelt werden. Die Zahl der Kauzyklen,

die Sequenzdauer und die Kaufrequenz können bei beiden Registrierungstypen gemessen werden.

Zusammenfassend stehen nach Woda und Mitarbeiter zwei Kriterien zur Auswahl, um eine beeinträchtigte Kaufunktion zu erkennen. Das erste Kriterium kann Veränderung in der Partikelgrößenverteilung bei einem festgelegten Nahrungsbolus sein. Das zweite Kriterium kann im Auftreten einer Kauffrequenzänderung basieren. Als Ergebnis der Studie von Woda et al. war die Kauffrequenz der Parameter mit der besten Reproduzierbarkeit innerhalb eines Individuums.

Außerdem zeigte sich bei gesunden Probanden in der Frequenz die geringste Variation, auch in Bezug auf Änderung der Nahrungshärte und Alterung. Demgegenüber traten bei Vollprothesenträgern, Patienten mit kranio-mandibulären Dysfunktionen oder behinderten Menschen mit Down-Syndrom variierende Minderleistungen in der Kauffrequenz auf (siehe auch Kapitel 1.1). Woda et al. zogen den naheliegenden Schluss, dass stabile Kauffrequenzwerte als ein Kriterium für einen gesunden Kauvorgang betrachtet werden können, wohingegen größere Schwankungen um die mittlere Kauffrequenz ein Indikator für eine beeinträchtigte Kauffunktion seien.

In vorliegender Arbeit wurde darauf geachtet, dass alle Probanden sich dadurch auszeichneten, dass subjektiv keine Funktionsstörungen und nur bei einigen Personen Gelenkgeräusche vorhanden waren. Es wurden keine auffälligen Dyskoordinationen oder Limitationen festgestellt, und es bestand Vollbezahnung oder weitgehende Vollbezahnung mit feststehendem Zahnersatz (siehe Kapitel 3.1.1). Damit und mit dem vorgegebenen Nahrungsbolus sowie den bei jedem Probanden und jeder Messung gleichen Umgebungsbedingungen wurde eine weitgehende Standardisierung für die vorliegenden Messungen erreicht.

Throckmorton fand im Jahre 2000 in einer Untersuchung heraus, dass die Kauzyklus-Variation und -dauer sowie die Kieferausslenkung am kleinsten bei

schnellem Kauen und am größten bei langsamem Kauen war. Die Schwankung in der jeweiligen Höchstgeschwindigkeit war bei jeder der drei Kauraten gleich groß (Throckmorton et al. 2001). In der vorliegenden Arbeit wurde den Probanden keine Frequenzvorgabe gemacht, mit der das Weingummi zerkaut werden sollte. Damit kam bei den vorliegenden Messungen die jeweilige habituelle Kaufrequenz für den vorgegebenen Nahrungsbolus zum Tragen.

6 Zusammenfassung

Kaubewegungen stellen variantenreiche Bewegungen dar, die in Abhängigkeit von der Nahrungstextur und von individuellen Gegebenheiten mehr oder weniger deutlich die Zahnführung in der Dynamik nutzen und eine klare Tendenz zur Zentrierung in der Statik aufweisen.

Mit Hilfe elektronischer Messsysteme kann die Unterkieferbewegung dreidimensional erfasst werden. Die hierbei erhaltenen Werte sind für die Analyse funktioneller Bewegungsabläufe des Unterkiefers und für okklusale Rekonstruktionen unter Verwendung geeigneter Artikulatorsysteme von Bedeutung.

In der vorliegenden Arbeit wurden bei 39 Testpersonen Bewegungsabläufe des Unterkiefers mit Hilfe des Ultraschall-Laufzeit-Messsystems „Jaw Motion Analyzer“ aufgezeichnet und zahngeführte Grenzbewegungen in ihren initialen exkursiven Führungswinkeln mit den entsprechenden Bewegungsanteilen des freien Kauens in der Sagittal-, Frontal- und Horizontalebene verglichen. Für die Protrusion in der Sagittalebene und die Links-Laterotrusion in der Frontalebene ergaben sich signifikante Unterschiede, während bei Rechts-Laterotrusion in der Frontalebene und in der kompletten Horizontalebene die Differenzen der Bewegungsbahnen keine Signifikanzen aufwiesen. Als Ursache für die Übereinstimmung der Bewegungsbahnen bei Rechts-Laterotrusion in der Frontalebene kann man einen Einfluss der Kauseitenpräferenz bei der Mehrheit der Bevölkerung für die rechte Seite vermuten.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Anwendung elektronischer Messsysteme grundsätzlich praxistaugliche Möglichkeiten bestehen, die individuellen Werte der artikulatorbezogenen Funktionsparameter auf der Grundlage physiologischer Vorgänge - wie dem Vorgang des Kauens - auszurichten.

7 Literaturverzeichnis

Amemiya K, Hisano M, Ishida T, Soma K (2002). Relationship between the flow of bolus and occlusal condition during mastication -- computer simulation based on the measurement of characteristics of the bolus. *J Oral Rehabil* 29(3), pp. 245-56.

Buschang PH, Hayasaki H, Throckmorton GS (2000). Quantification of human chewing-cycle kinematics. *Arch Oral Biol* 45(6), pp. 461-74.

Diernberger S, Bernhardt O, Schwahn C, Kordass B (2008). Self-reported chewing side preference and its associations with occlusal, temporomandibular and prosthodontic factors: results from the population-based Study of Health in Pomerania (SHIP-0). *J Oral Rehabil* 35(8), pp. 613-20.

Ekert O (1988). Beeinflussung von Kaumustern durch intraorale Fremdkörperreize (Inauguraldissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin). Mainz, Johannes-Gutenberg-Universität.

Ferrario VF, Sforza C, Schmitz JH, Serrao G (2001). Comparison of unilateral chewing movements vs. dental guidance through the dental guidance ratio. *J Prosthet Dent* 86(6), pp. 586-91.

Gerstner GE, Fehrman J (1999). Comparison of chin and jaw movements during gum chewing. *J Prosthet Dent* 81(2), pp. 179-85.

Goodson JM, Johansen E (1975). Analysis of human mandibular movement. *Monogr Oral Sci* 5(pp. 1-80).

Häggman-Henrikson B, Eriksson PO, Nordh E, Zafar H (1998). Evaluation of skin-versus teeth-attached markers in wireless optoelectronic recordings of chewing movements in man. *J Oral Rehabil* 25(7), pp. 527-34.

Hayasaki H, Nakata S, Nishijima N, Okamoto A, Minematsu K, Yamasaki Y, Nakata M (1999). A calculation method for the range of occluding phase at the lower incisal point during chewing movements using the curved mesh diagram of mandibular excursion (CMDME). *J Oral Rehabil* 26(3), pp. 236-42.

Hugger A (1997). Elektronische Registriersysteme für die zahnärztliche Praxis. In: Innovationen für die Zahnheilkunde. BJ Heinenberg editor. Balingen, Spitta.

Hugger A, Türp JC, Kerschbaum T (2006). Curriculum Orale Physiologie Berlin, Quintessenz Verlags-GmbH.

Klett R (1982). Elektronisches Registrierverfahren für die Kiefergelenksdiagnostik. Dtsch Zahnärztl Z 37(12), pp. 991-8.

Koeck B, Lückerrath W (1995). Instrumentelle Funktionsdiagnostik. In: Funktionsstörungen des Kauorgans. München-Wien-Baltimore, Urban&Schwarzenberg.

Levers BG, Darling AI (1983). Continuous eruption of some adult human teeth of ancient populations. Arch Oral Biol 28(5), pp. 401-8.

Luckenbach A (1983). Untersuchung zur Unterkieferbewegung mit Hilfe eines elektronischen, computergesteuerten Registriersystems (ECSR), Tübingen.

Mack H (1980). Instrumentelle Voraussetzungen zur Erfassung des okklusoartikulären Systems. Quintessenz Zahntech 6(7), pp. 63-71.

Meyer G, dal Ri H (1985). Dreidimensionale elektronische Messung der Bewegungen des Kondylus über die Scharnierachse des Unterkiefers. Dtsch Zahnärztl Z 40(8), pp. 881-6.

Miyawaki S, Ohkuchi N, Kawakami T, Sugimura M (2000). Effect of food size on the movement of the mandibular first molars and condyles during deliberate unilateral mastication in humans. J Dent Res 79(7), pp. 1525-31.

Mizuno T (1989a). Study on grinding movements in chewing. 2. Relationship between grinding movement in chewing-like empty jaw movement and occlusal form of molar. Nihon Hotetsu Shika Gakkai Zasshi 33(2), pp. 303-12.

Mizuno T (1989b). Study on grinding movements in chewing. 1. A comparison between grinding movement in chewing-like empty jaw movement and lateral excursion. Nihon Hotetsu Shika Gakkai Zasshi 33(1), pp. 43-56.

Murphy TR (1968). The progressive reduction of tooth cusps as it occurs in natural attrition. Dent Pract Dent Rec 19(1), pp. 8-14.

Murray GM, Bhutada M, Peck CC, Phanachet I, Sae-Lee D, Whittle T (2007). The human lateral pterygoid muscle. *Arch Oral Biol* 52(4), pp. 377-80.

Ogawa T, Koyano K, Suetsugu T (1997). Characteristics of masticatory movement in relation to inclination of occlusal plane. *J Oral Rehabil* 24(9), pp. 652-7.

Ogawa T, Koyano K, Umemoto G (1998). Inclination of the occlusal plane and occlusal guidance as contributing factors in mastication. *J Dent* 26(8), pp. 641-7.

Piehslinger E, Celar AG, Celar RM, Slavicek R (1991). Computerized axiography: principles and methods. *J Craniomandib Pract* 9(4), pp. 344-55.

Pröschel P, Hofmann M (1988). Frontal chewing patterns of the incisor point and their dependence on resistance of food and type of occlusion. *J Prosthet Dent* 59(5), pp. 617-24.

Pröschel P, Morneburg T, Hugger A, Kordass B, Ottl P, Niedermeier W, Wichmann M (2002). Articulator-related registration -- a simple concept for minimizing eccentric occlusal errors in the articulator. *Int J Prosthodont* 15(3), pp. 289-94.

Reitemeier B, Schwenzer N, Ehrenfeld M (2006). Einführung in die Zahnmedizin Stuttgart, Georg Thieme Verlag.

Salsench J, Martinez-Gomis J, Torrent J, Bizar J, Samso J, Peraire M (2005). Relationship between duration of unilateral masticatory cycles and the type of lateral dental guidance: a preliminary study. *Int J Prosthodont* 18(4), pp. 339-46.

Sasamoto K, Nishimuta K, Yasumatsu K, Ninomiya Y (2001). Analysis of rhythmical jaw movements produced by taste stimulation in rats. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)* 47(2), pp. 156-60.

Schindler HJ, Stengel E, Spieß WEL (1997). Der Einfluss von Muskel-, Parodontal- und Gelenkpropriozeptoren auf die Steuerung des Kauvorganges - Eine klinisch-experimentelle Studie. *Dtsch Zahnärztl Z* 52(9), pp. 624-8.

Schindler HJ, Stengel E, Spieß WEL (1998). Elektromyographische Aktivität, Kraftentwicklung und Kinematik beim Kauen fester Nahrungstexturen. *Dtsch Zahnärztl Z* 53(8), pp. 551-6.

Slavicek R (1988). Clinical and instrumental functional analysis for diagnosis and treatment planning. Part 7. Computer-aided axiography. *J Clin Orthod* 22(12), pp. 776-87.

Tallgren A (1957). Changes in adult face height due to ageing, wear and loss of teeth and prosthetic treatment. *Acta Odontol Scand* 15 Suppl (24), pp. 1-122.

Throckmorton GS, Buschang BH, Hayasaki H, Phelan T (2001). The effects of chewing rates on mandibular kinematics. *J Oral Rehabil* 28(4), pp. 328-34.

Varela JM, Castro NB, Biedma BM, Da Silva Dominguez JL, Quintanilla JS, Munoz FM, Penin US, Bahillo JG (2003). A comparison of the methods used to determine chewing preference. *J Oral Rehabil* 30(10), pp. 990-4.

Woda A (2005). A step toward setting norms: comments on the occlusal interface. *Int J Prosthodont* 18(4), pp. 313-5.

Woda A, Foster K, Mishellany A, Peyron MA (2006a). Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food. *Physiol Behav* 89(1), pp. 28-35.

Woda A, Mishellany A, Peyron MA (2006b). The regulation of masticatory function and food bolus formation. *J Oral Rehabil* 33(11), pp. 840-9.

Danksagung

Meinen Dank aussprechen möchte ich Herrn Prof. Dr. Ulrich Stüttgen für die Ermöglichung der Durchführung dieser Dissertations-Arbeit innerhalb der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik.

Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Alfons Hugger, der mir freundschaftlich mit Rat und Tat bei der Verwirklichung dieser Arbeit zur Seite gestanden hat, für die freundliche Überlassung des Themas sowie die konstruktive Kritik und Motivation bedanken.

8 Lebenslauf

Name: Hartwig Ellerbrock

Geburtsdatum: 11.11.1976

Geburtsort: Neuss

Ehefrau: Bianca Ellerbrock, geb. Lalut (Zahnärztin)

Vater: Dr.-Ing. Hans-Georg Ellerbrock (Stellv. Abteilungsleiter im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) Düsseldorf, i. R.)

Mutter: Heidrun Ellerbrock, geb. Abelman (Lehrerin i. R.)

Geschwister: Dr. med. dent. Katrin Pfingsten geb. Ellerbrock (42 J.)

Frank Ellerbrock (40 J.), Zimmerermeister im Holzimport und –vertrieb

Schulbesuch:

1983 – 1987: Städt. Kath. Grundschule Neuss-Hoisten

1987 – 06/1996: Städt. Gymnasium Neuss-Norf

Abschluss mit dem Zeugnis der allgemeinen Hochschulreife

Zivildienst:

07/1996 – 07/1997: Städt. Kliniken Neuss, Lukaskrankenhaus, Institut für Radiologie und Nuklearmedizin

Studium:

10/1997 – 01/2004: Studium der Zahnmedizin an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf; Staatsexamen mit dem Abschluss der Zahnärztlichen Prüfung

Berufstätigkeit:

03/2004 – 04/2004: Weiterbildungsassistent in der kieferorthopädischen Fachzahnarztpraxis Dr. med. dent. C. Wiegand, Düsseldorf-Benrath

seit 06/2004: wissenschaftlicher Mitarbeiter der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Westdeutschen Kieferklinik Düsseldorf (Direktor: Univ.-Prof. Dr. U Stüttgen), seit 10/2008 Teilzeit

seit 10/2008: Teilzeit-Anstellung als Assistenzzahnarzt in der Zahnarztpraxis Dr. med. A. Kurbad, Viersen-Dülken

Düsseldorf, den 18.11.2008

Abstract

Vergleich von Führungswinkeln rein zahngeführter Grenzbewegungen mit Führungswinkeln des freien Kauens mit Hilfe des JMA-Systems

vorgelegt von Hartwig Ellerbrock

Kaubewegungen stellen variantenreiche Bewegungen dar, die in Abhängigkeit von der Nahrungstextur und von individuellen Gegebenheiten mehr oder weniger deutlich die Zahnführung in der Dynamik nutzen und eine klare Tendenz zur Zentrierung in der Statik aufweisen.

Für die Artikulatortechnik ergibt sich die Folgerung, dass die Einstuerung artikulatorbezogener Funktionsparameter anhand weit exkursiver Unterkieferpositionen nicht sinnvoll erscheint.

In der vorliegenden Arbeit wurden bei 43 Testpersonen Bewegungsabläufe des Unterkiefers mit Hilfe des Ultraschall-Laufzeit-Messsystems „Jaw Motion Analyzer“ aufgezeichnet und zahngeführte Grenzbewegungen in ihren initialen exkursiven Führungswinkeln mit den entsprechenden Bewegungsanteilen des freien Kauens in drei Ebenen verglichen. Für die Protrusion in der Sagittalebene und die Links-Laterotrusion in der Frontalebene ergaben sich signifikante Unterschiede, während bei Rechts-Laterotrusion in der Frontalebene und in der kompletten Horizontalebene die Differenzen der Bewegungsbahnen keine Signifikanzen aufwiesen. Möglicherweise ist eine Kauseitenpräferenz der Mehrheit der Bevölkerung für die rechte Seite als Ursache für die Übereinstimmung der Bewegungsbahnen bei Rechts-Laterotrusion in der Frontalebene anzusehen.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Anwendung elektronischer Messsysteme grundsätzlich praxistaugliche Möglichkeiten bestehen, die individuellen Werte der

artikulatorbezogenen Funktionsparameter auf der Grundlage physiologischer Vorgänge - insbesondere der Bewegungsvorgänge beim Kauen - auszurichten.